

Санкт-Петербургский государственный университет

***ГОЛЬМ Мария Александровна***

**Выпускная квалификационная работа**

***Анализ изменения свойств дисперсных грунтов различных типов  
под влиянием токов катодной защиты***

Уровень образования: магистратура

Направление: 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа: ВМ.5798.2020

*«Гидрогеология и инженерная геология»*

Научный руководитель:

Зав. кафедры грунтоведения и инженерной геологии Института наук о Земле СПбГУ, к.г.-м.н.,  
Бурлуцкий С.Б.

Рецензент:

Главный специалист по ПКЗ  
ЗАО «Трубопроводные системы и технологии», к.г.-м.н.  
Яблучанский А.И.

Санкт-Петербург

2022

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
СПИСОК ПРИНЯТЫХ ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Электрокинетические явления и процессы в грунтах	6
1.1 Понятие о дисперсных грунтах	6
1.2 Теория двойного электрического слоя (ДЭС)	7
1.3 Электрокинетические явления в грунтах	13
Глава 2. Явление коррозии и электрохимическая защита	19
2.1 Общие положения	19
2.2 Коррозионная активность грунта	23
2.3 Последствия коррозии и защита от неё	28
Глава 3. Геоморфологические и геологические условия	34
Глава 4. Проведение исследования и результаты	39
4.1 Характеристика трубопроводов	39
4.2 Методика и результаты	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	55
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	56
ПРИЛОЖЕНИЯ	60
Приложение 1	60
Приложение 2	61
Приложение 3	62
Приложение 4	63
Приложение 5	64
Приложение 6	65

## СПИСОК ПРИНЯТЫХ ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ

г. – город

КИП – контрольно-измерительный пункт

МГ – магистральный трубопровод

ПКЗ – противокоррозионная защита

СКЗ – станция катодной защиты

СКМ – система коррозионного мониторинга

СПб – Санкт-Петербург

УКЗ – установка катодной защиты

уч. – участок

ЭХЗ – электрохимическая защита

## ВВЕДЕНИЕ

Современный мир невозможно представить без использования газопроводов, нефтепроводов, других трубопроводов и коммуникаций. С каждым годом количество строящихся и эксплуатируемых подземных металлических конструкций увеличивается. Таким образом, только в России протяженность магистральных трубопроводов превышает 217 тыс. км (*МЧС России, 03.03.2022*).

В связи с этим увеличивается вероятность коррозионного воздействия на данные линейные сооружения, соответственно, повышаются риски возникновения негативных последствий. В промышленно развитых странах убытки от коррозии металла ежегодно составляют примерно 10% от их национального дохода (*Яблучанский, 2016*).

Противокоррозионные мероприятия включают в себя нанесение изоляционных защитных покрытий (органических, неорганических), легирование металла с целью повышения коррозионной стойкости, снижение агрессивности коррозионной среды и электрохимическую защиту (*Бурлуцкий, Еремеева, 2020*).

Применение электрохимической защиты является эффективным и действенным способом борьбы с явлением электрохимической коррозии. Катодная поляризация трубопроводов с помощью внешних источников постоянного тока, что носит название катодной защиты, применение которой необходимо в качестве защитной меры. Однако, в результате применения катодной защиты происходит изменение физико-химических свойств грунтов, расположенных непосредственно у защищенных трубопроводов.

Данные факты говорят о необходимости изучения зоны формирования техногенно-измененных грунтов под влиянием токов катодной защиты в целях снижения коррозионной обстановки и предотвращения развития необратимых процессов, влияющих на последующее строительство и эксплуатацию инженерных сооружений.

**Объект исследования** – грунты, вмещающие магистральные газопроводы Кипень-Петродворец и Конная Лахта, и грунты, залегающие на расстоянии 2-х метров от газопроводов.

**Предмет исследования** – физико-химические свойства грунтов и закономерности их изменения.

**Целью** научно-исследовательской работы является анализ изменения свойств дисперсных грунтов различных типов под влиянием токов катодной защиты.

**Задачи, направленные на достижение поставленной цели:**

1. Изучение электрохимических и электрокинетических явлений в грунтах;
2. Отбор дисперсных грунтов, вмещающих магистральные газопроводы, и грунтов, залегающих на расстоянии 2-х метров от них;
3. Лабораторное изучение физико-химических свойств грунтов;
4. Анализ и интерпретация полученных данных с помощью комплекса компьютерных программ Microsoft Office (Word, Excel) и с привлечением литературных данных. Выявление зависимостей изменения физико-химических свойств от величины защитного потенциала газопроводов.

**Фактический материал и личный вклад автора.** Магистерская диссертация основана на материале, который был получен в ходе преддипломной производственной практики в ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», а затем самостоятельно исследован в грунтовой лаборатории и обработан с помощью комплекса компьютерных программ.

**Научная новизна** состоит в том, что в работе впервые исследовано влияние токов катодной защиты газопровода на грунты в естественных условиях и выявлены закономерности изменения физико-химических свойств грунтов. Ранее подобные исследования уже проводились, однако, только в рамках моделирования в лабораторных условиях на одном типе грунта.

**Практическая значимость** изучения физико-химических свойств грунтов и выявления закономерностей их изменения в зависимости от величины защитного потенциала заключается в практическом применении при выборе оптимальных параметров электрохимической защиты трубопроводов.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю к.г.-м.н. Бурлуцкому С.Б., рецензенту, главному специалисту ПКЗ ЗАО «Трубопроводные системы и технологии» и к.г.-м.н. Яблчанскому А.И., заведующей грунтовой лабораторией СПбГУ Лаздовской М.А. за помощь в проведении исследования. Особую признательность начальнику отдела электро-химической защиты ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» Зайцеву А.Н, а также Корякову И.В. и Романову Е.В. за сопровождение на участки магистральных газопроводов.

# Глава 1. Электрокинетические явления и процессы в грунтах

## 1.1 Понятие о дисперсных грунтах

В целях оценки влияния наложенного электрического поля на физико-химические свойства дисперсных грунтов необходимо понимание того, что они собой представляют, а также какие электрокинетические процессы в них могут протекать.

Грунт – многофазная динамическая дисперсная система, состоящая из твердой, жидкой, газообразной и биотической компоненты. Твердая компонента представлена минеральной и органической составляющей; жидкая – представляет собой воду и растворы электролитов, заполняющие пористое пространство; газообразная – различные газы, содержащиеся в пустотах. К биотической компоненте относятся живущие в грунтах микроорганизмы.

К дисперсным относятся грунты, в котором преобладают механические, физические и физико-химические структурные связи. Выделяют следующие виды: глинистые, торфы, илы, пески и крупнообломочные грунты. Наибольший интерес в данной работе представляют именно глинистые грунты. Согласно ГОСТу 25100-2020 глинистый грунт – связный грунт, обладающий свойством пластичности за счет содержания минеральных частиц глинистой и пылеватой фракций. Глинистые грунты в зависимости от содержания глинистых частиц классифицируются на супеси, суглинки и глины. Данный тип грунта широко распространен, встречается среди пород различного возраста и составляет более 65% всей массы осадочных пород (*Грунтоведение, 2005*). Данные грунты могут залегать в виде толщ, слоев, прослоев, линз и др. различной мощности.

Глинистые частицы занимают особое место из-за особенных свойств, которые проявляются при взаимодействии минералов с водой (набухание, липкость, ионный обмен). Глинистый грунт во влажном состоянии обладает высокой пластичностью и большой сжимаемостью при действии статических нагрузок. При динамических нагрузках не уплотняется, но может снижать прочность. После прекращения динамических воздействий прочность грунта частично или полностью восстанавливается, т.е. он может обладать специфическими тиксотропными свойствами. Такой грунт в зависимости от материала слагающих его частиц при изменении содержания в нем воды меняет объем, набухает при увлажнении и получает усадку при высыхании (*Далматов, 1988*).

К наиболее распространенным глинистым минералам относятся слоистые силикаты (гидрослюда, монтмориллонит, каолинит, хлорит). Как правило, они имеют

пластинчатую или игольчатую форму, а размеры кристаллов не превышают 1–2 мкм, при этом соотношение длины к толщине кристаллов может превышать десятки раз (Мангушев и др., 2015).

Большинство твердых глинистых частиц в естественном состоянии заряжено отрицательно. Сила заряда частиц зависит от их минерального состава и удельной площади поверхности. Чем больше удельная площадь поверхности, тем больше сила заряда. Глинистые частицы в большинстве случаев гидрофильны, что обусловлено их поверхностной активностью по отношению к воде. Поэтому содержание глинистых частиц в грунте оказывает существенное влияние на свойства грунтов, и в первую очередь на характер их связности (Мангушев и др., 2015).

## 1.2 Теория двойного электрического слоя (ДЭС)

Толчком для формирования представлений о строении ДЭС послужило открытие электрокинетических явлений. Электрическое строение межфазной границы “твердое тело-жидкость” одним из первых объяснил немецкий физик Г. Квинке в конце 19 века.

При контакте твердого тела с раствором электролита происходит ряд процессов, приводящих к зарядению поверхности: адсорбция (достройка кристаллической решётки) ионов на поверхности твердого тела; диссоциация поверхностных групп; переход ионов одного знака из твердого тела в раствор, когда на поверхности остается фрагмент группы противоположного заряда; поляризация поверхности (для металлов – наличие избытка/недостатка электронов на поверхности) (Курс лекций..., 19.04.2020).

Предполагалось, что в результате контакта двух фаз электрические заряды перераспределяются между фазами таким образом, что фазы заряжаются с противоположными знаками и с зарядами равной величины. В результате чего образуется система зарядов, получившая название **двойного электрического слоя** (ДЭС), а между фазами образовывается разность электрических потенциалов ( $\phi$ ) (Королёв, 2015).

По теории Гельмгольца-Перрена ДЭС на границе раздела фаз представляет собой плоскопараллельный молекулярный конденсатор (толщиной несколько молекулярных слоев), внутренняя обкладка которого обусловлена зарядами твердого тела, а внешняя – зарядами, находящимися в газе или жидкости. Впоследствии данная идея развивалась в рамках теории Л.Ж. Гуи и Д. Чепмена.

В системе «коллоидные частицы – раствор электролита» носителями электрического заряда являются ионы. Ионы внешней обкладки называются противоионами, а ионы, образующие внутреннюю обкладку и вызывающие возникновение межфазного потенциала, – потенциалопределяющими (Королёв, 2015).

Учёными было установлено, что ДЭС может образовываться не только при переходе ионов через границу раздела фаз при специфической адсорбции и поверхностной диссоциации, а также в результате изоморфных замещений компонентов твердой фазы кристаллической решетки, при которых извне поглощается электрон и твердая фаза минерала приобретает отрицательный заряд (Королёв, 2015).

На сегодняшний день общепризнанной считается теория О.Штерна, который объединил схемы Гельмгольца-Перрена и Гуи-Чепмена, беря в расчет размеры ионов и роль специфической адсорбции противоионов под действием некулоновских (вандерваальсовых) сил.

Основным положением в модели строения ДЭС О. Штерна является разделение "внешней" обкладки слоя противоионов на внутреннюю и внешнюю части (рис.1). Внутренняя часть представляет собой первый или несколько первых слоев противоионов, которые под влиянием электростатических и адсорбционных сил прочно притягиваются к твердой поверхности. Эта часть ДЭС носит название "адсорбционного" слоя, «плотного слоя» и слоя "Гельмгольца-Штерна" (Воюцкий, 1976; Злочевская, 1969; Фридрихсберг, 1984). Толщиной данного слоя является расстояние от поверхности до центра тяжести зарядов внутренней обкладки ДЭС (т.е. до плоскости, проходящей через центры ближайших к поверхности противоионов). Противоионы, которые необходимы для компенсации зарядов потенциалопределяющих ионов, образуют диффузный слой ДЭС, или слой Гуи (Воюцкий, 1976).

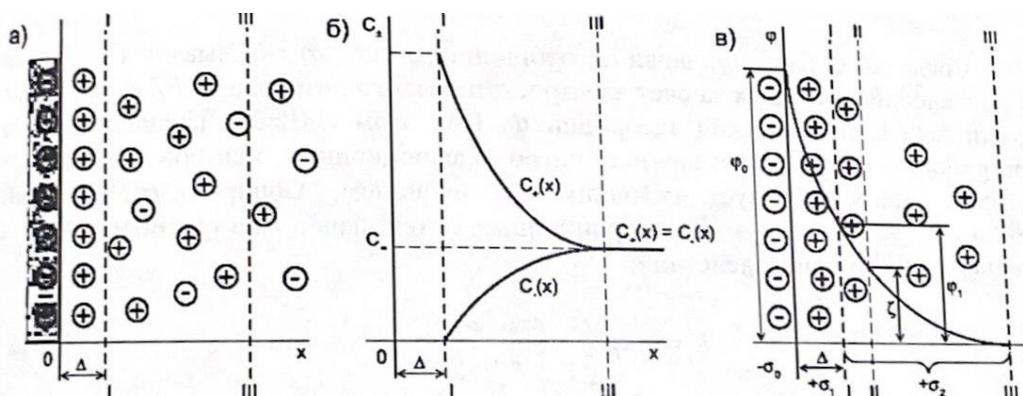


Рис.1 Схема строения ДЭС по О. Штерну: а – распределение ионов вблизи отрицательно заряженной поверхности; б – изменение концентрации катионов и анионов вблизи поверхности; в – падение потенциалов по нормали к поверхности и распределение избыточных ионов; I-I – граница адсорбционного слоя; II-II – плоскость скольжения жидкости; III-III – граница диффузного слоя и равновесного раствора (внешняя граница ДЭС) (Королёв, 2015)

В современной теории ДЭС используют предложенную в 1947 г. Д. Грэмом модель трех последовательно соединённых конденсаторов. По мере развития учения об электрокинетических процессах, теории ДЭС нашли также отражение в более сложных моделях.

ДЭС можно классифицировать по толщине защитных плёнок или слоёв воды, конфигурации и в зависимости от параметров внешнего электрического поля. Если в силу малой толщины плёнки отсутствует какая-либо периферийная часть ДЭС, то считается, что двойной слой “неразвитый” или “тонкий”. Если же ДЭС полностью соответствует эталонному строению, то говорят о “развитом” или “толстом” двойном электрическом слое. Выделяются также свободные и перекрывающиеся ДЭС, в зависимости от того до какой степени сближены противоположные границы раздела фаз. Если же расстояние является таким, что ДЭС границ раздела фаз взаимодействуют между собой, то они могут либо отталкиваться (в случае одноименных зарядов), либо притягиваться.

По конфигурации ДЭС выделяют плоские, возникающие вблизи плоских границ раздела фаз, сферические (вокруг сферических и близких к ним границ раздела), цилиндрические, а также ДЭС более сложной формы. Для глинистых частиц, в которых радиус частиц много больше приведенной (обратной) толщины двойного электрического слоя, вполне применима теория плоского (Королёв, 2015).

В зависимости от параметров внешнего электрического поля выделяются равновесный ДЭС и неравновесный, или поляризованный, ДЭС, частным случаем которого является стационарный ДЭС. Равновесный возникает в нулевом или постоянном электрическом поле, неравновесный - при наличии переменного электрического тока.

Различные возможные сочетания ДЭС обуславливают все многообразие многочисленных видов двойных электрических слоёв в природных дисперсных системах, сложность и специфику проявления в них электроповерхностных явлений (Королёв, 2015).

При взаимодействии дисперсных грунтов с водными растворами протекают реакции между полярным растворителем ( $H_2O$ ) и адсорбционным центром твердой поверхности, в результате чего на поверхности появляются новые активные центры.

За счет поверхностной диссоциации функциональных групп глинистых минералов процессы, обусловленные спецификой кристаллохимического строения дисперсных минералов, свойствами окружающего раствора, его концентрацией,

зарядом ионов, величиной рН, а также адсорбция некоторых ионов из раствора (Королев, 2015).

Процесс гидратации ионов способствует диссоциации. Гидратация поверхности дисперсных минералов в грунтах происходит в два этапа. Первый этап является взаимодействием  $H_2O$  с координационно-ненасыщенными атомами, ионами решетки и обменными катионами. Гидратация может зависеть от валентности и размеров ионов, а также при гидратации необходимо учитывать степень их взаимодействия с поверхностью. С ростом данных параметров гидратируемость ионов становится выше. В общем случае выделяется следующий ряд катионов:  $Fe^{3+} > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Li^+ > Na^+ > K^+$ .

Процесс гидратации ионов ослабляет взаимодействие с поверхностью и способствует “диссоциации”. В результате этого ряд гидратируемости ионов отличается от вышеприведенного ряда их поверхностной «диссоциируемости»: ( $Li^+ > Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Fe^{3+}$ ). Ионом калия часто пренебрегают в данном ряду, потому что из-за низкой степени гидратируемости он начинает компенсировать поверхностные заряды на коротких расстояниях, утрачивая при этом способность к диссоциации (Злочевская, Королев, 1988).

Для дисперсных агрегатов характерна «отрицательная» физическая адсорбция ионов из раствора, так как дисперсные минералы – полярные адсорбенты, активно взаимодействующие с водой. Несмотря на это, при определенных обстоятельствах может происходить и «положительная» «специфическая» адсорбция ионов – хемосорбция, или сверхэквивалентная адсорбция многовалентных ионов, или избирательная адсорбция (Королев, 2015).

Хемосорбция может происходить в том случае, когда ионы образуют нерастворимое химическое соединение с ионами минеральной поверхности грунта. Сверхэквивалентная адсорбция многовалентных ионов железа, алюминия и др. Происходит на заряженных и незаряженных участках поверхности минерала, также при возникновении межмолекулярных ван-дер-ваальсовых сил (Королев, 2015). Избирательная адсорбция происходит в случае, когда ионы являются изоморфными. При адсорбции в данном случае достраивается структура кристаллической решетки.

Двойной электрический слой в дисперсных грунтах образуется в результате ориентировки ионов одного знака, на что в свою очередь оказывает влияние избыток ионов другого знака.

При низкой концентрации раствора, который взаимодействует с породой, 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).

Таким образом, процесс гидратации породы из стадии адсорбции воды на активных центрах переходит во **второй этап** гидратации - "осмотического" впитывания влаги из раствора и формирования диффузной части ДЭС (Королев, 2015).

Ионы, расположенные на поверхности минеральной фазы, являются потенциалопределяющими и сообщают данной поверхности определенный знак и размер заряда. В свою очередь, те ионы, которые перешли в приповерхностную область порового раствора ионы противоположного знака являются противоионами.

Предполагается, что особенность образования ДЭС глинистых грунтах связана в основном с «диссоциацией» поверхностных ионогенных групп, и она обуславливает противоионов ДЭС в пристенной области (до 90%), по сравнению с диффузной (Злочевская, 1969).

Чем выше концентрация электролита, тем больше подавляются процессы поверхностной диссоциации ионов подавлены, а «осмотический» переток влаги отсутствует и ионы диффузного слоя оказываются в пристенной части ДЭС (Королев, 2015).

Обменные реакции в грунтах происходят вследствие непрерывного обмена противоионов ДЭС с ионами раствора. Ионообмен обладает следующими особенностями (Королев, 2015):

1. Реакции обмена в строго эквивалентных соотношениях. Они являются в обратимыми в случае, если не сопровождаются хемосорбцией или, или адсорбцией многовалентных ионов. Реакции обмена обладают меньшей скоростью, чем физическая адсорбция.

2. На интенсивность обмена влияют валентности ионов в растворе, радиус, концентрации в растворе, соотношения жидкой и твердой фаз. Скорость реакции обмена и энергия вхождения ионов в обменный комплекс грунта будет расти пропорционально данным параметрам.

3. Ряд ионов по энергии их вытеснения из обменного состояния соответствует так называемому 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. На скорость катионного обмена влияет рост водородного показателя раствора, на скорость анионного - снижение pH.

Ионный обмен оказывает непосредственное влияние на свойства ДЭС, однако необходимо также учесть состав, структуру и свойства жидкой компоненты грунта, которая может оказывать значительное воздействие на электрокинетические свойства.

Исходя из всего вышенаписанного, можно рассмотреть строение двойного электрического слоя на примере мицеллы. *Мицелла* (англ. micelle) — отдельная частица высокодисперсной коллоидной системы с жидкой дисперсионной средой (*Словарь...*, 27.04.2022). Она состоит из ядра и поверхностной стабилизирующей оболочки.

Для того, чтобы мицелла образовалась, нужны следующие условия (*Шубенкова, 2014*):

а) образование в результате реакции труднорастворимого вещества,  $m$  молекул которого образуют агрегат коллоидной частицы.

б) наличие стабилизатора – электролита, предоставляющего ионы, адсорбируемые поверхностью труднорастворимого соединения.

Согласно правилу Панетта – Фаянса лучше всего адсорбируется тот ион, который входит в состав кристаллической решетки адсорбента. Адсорбируемые ионы, достраивающие кристаллическую решетку труднорастворимого соединения, называют потенциалопределяющими ионами коллоидной частицы, поскольку заряд частицы по знаку совпадает с зарядом этих ионов. Адсорбция потенциалопределяющих ионов происходит самопроизвольно, сопровождаясь уменьшением свободной энергии поверхности агрегата ( $\Delta G_s$ ). Стабилизатором, как правило, является исходное вещество, взятое в избытке (*Шубенкова, 2014*).

Агрегат с потенциалопределяющими ионами образуют ядро мицеллы. Другие ионы стабилизатора (противоионы) образуют около твердой поверхности два слоя: адсорбционный (неподвижный), прочно связанный с ядром, и диффузный (подвижный), расположенный на определенном расстоянии от ядра в дисперсионной среде. Ядро совместно с адсорбционным слоем противоионов называется коллоидной частицей (гранулой) (*Шубенкова, 2014*) (рис.2).

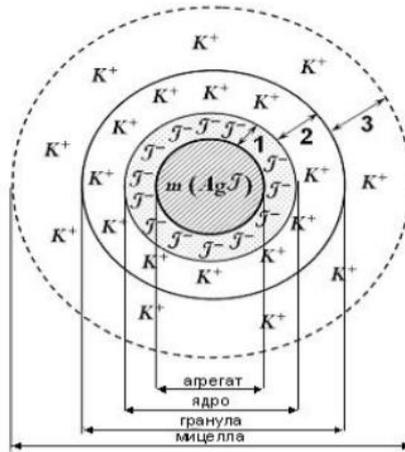


Рис.2 Схема строения коллоидной мицеллы в реакции  $\text{AgNO}_3$  и  $\text{KI}$ :

- 1 – адсорбционный слой потенциалопределяющих ионов; 2 – адсорбционный слой противоионов;  
3 – диффузный слой противоионов (Шубенкова, 2014)

### 1.3 Электрокинетические явления в грунтах

Смещение диффузного слоя, его отрыв от мицеллы или, наоборот, возникновение разности потенциалов при движении мицеллы называют электрокинетическими явлениями (рис.3).

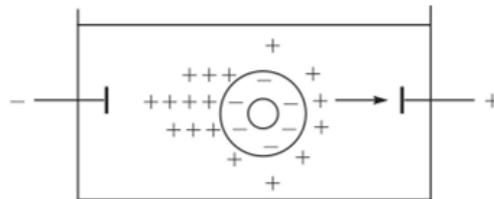


Рис.3 Перемещение частицы в электрическом поле (Зайцев, 2015)

Все электрокинетические явления обусловлены двойным электрическим слоем и определяются возникновением электрокинетического  $\zeta$  (дзета)-потенциала (Зайцев, 2015). Электрокинетический потенциал определяет агрегативную устойчивость высокодисперсных систем, структурообразование, явления адсорбции (Баранов, Фролов, 2002).

Зная линейную скорость движения коллоидных частиц в электрическом поле, величину электрокинетического потенциала можно рассчитать по уравнению Гельмгольца – Смолуховского (Клындюк, 2011):

$$\zeta = \frac{\vartheta \eta}{\epsilon \epsilon_0 H},$$

где  $\eta$  – вязкость дисперсионной среды;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды (воды);  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $H$  – градиент электрического потенциала (напряженность электрического поля).

Электрокинетические явления наблюдаются и в дисперсных системах, и в капиллярах и связаны с подвижностью диффузного слоя ионов (Зайцев, 2015). Все электрокинетические явления делятся на прямые и обратные.

К прямым электрокинетическим явлениям относят явления, при которых движение одной фазы дисперсной системы относительно другой происходит вследствие помещения системы в электрическое поле (вызвано разностью потенциалов в системе) (Клындюк, 2011). Наиболее важные среди них — электрофорез, электроосмос и электрокоагуляция.

К обратным электрокинетическим явлениям относят явления, при которых движение одной фазы дисперсной системы относительно другой вызывает возникновение в системе разности потенциалов (электрического поля). Примерами обратных электрокинетических явлений выступают потенциал течения и потенциал седиментации (Клындюк, 2011).

Электрокинетические явления можно представить в виде схемы (рис.4)



Рис.4 Взаимосвязь между электрокинетическими явлениями (Зайцев, 2015)

**Электроосмосом** называется процесс движения жидкости через капилляры или пористую систему вследствие наложения внешнего электрического поля (рис.5).

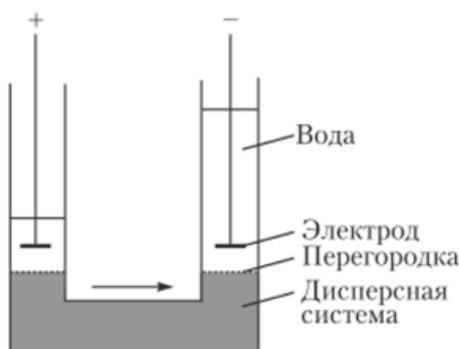


Рис.5 Электроосмос (Зайцев, 2015)

Процесс электроосмоса обусловлен движением гидратированных противоионов диффузной части ДЭС вследствие действия внешнего электрического поля к противоположно заряженному электроду, в ходе чего увлекаются молекулы

воды. Движение заряженного слоя передается соседним слоям незаряженной жидкости, и за счет внутреннего трения возникает движение массы (объема) жидкости (Клындюк, 2011).

Рассматривая данный процесс подробнее, необходимо отметить, что вблизи поверхности в наружной части диффузного слоя противоионов имеется избыток ионов одного знака заряда. Приложение электрического поля к капилляру, наполненному жидкостью, заставляет сольватированные противоионы диффузного слоя сдвигаться к противоположно заряженному полюсу. Ионы внутренней обкладки двойного слоя (потенциалопределяющие ионы), так же как и противоионы наружной обкладки не перемещаются, так как для преодоления электростатических и адсорбционных сил, действующих в ДЭС, нужно приложить огромные напряжения, неосуществимые в реальных условиях (Баранов, Фролов, 2002).

Процесс электроосмоса напрямую влияет на строение двойного электрического слоя. ДЭС изменяется вследствие того, что в результате протекания электроосмоса на аноде создаётся кислая среда, на катоде - щелочная.

Количество перенесенной жидкости пропорционально силе тока, а объем перенесенной жидкости, отнесенный к единице силы тока, не зависит от площади сечения капиллярной системы (мембраны) и толщины мембраны (длины капилляров) и возрастает с увеличением электрического сопротивления раствора (уменьшении концентрации электролита) (Баранов, Фролов, 2002).

Таким образом, чем больше противоионов находится в диффузной области (чем больше величина  $\zeta$ -потенциала), тем большая сила будет приложена к жидкости в капилляре и с большей скоростью жидкость будет перемещаться.

В процессе электроосмоса самые крупные структурные преобразования происходят в катодной и анодной зонах. Такие структурных преобразования могут быть вызваны следующими факторами:

Электроосмотическое осушение приводит к уплотнению грунта на аноде;

1. Вследствие увлажнения грунта в ходе электроосмоса происходит его разуплотнение на катоде;
2. На электродах протекает процесс электрокоагуляции дисперсных частиц (особенно на катоде);
3. В анодной и катодной зонах меняется pH;
4. В результате электрохимического переноса у электродов могут концентрироваться ионы.

К параметрам электроосмоса относятся: линейная скорость электроосмоса ( $v_{эо}$ ), объемная скорость электроосмоса, коэффициент электроосмоса ( $K_{эо}$ ), величина электроосмотического переноса воды ( $P_{эо}$ ), электроосмотическая высота подъема ( $h_э$ ).

Величина электроосмотического переноса воды ( $P_{эо}$ ) как и  $\zeta$ -потенциал в глинистых грунтах зависит от целого ряда факторов. К внутренним факторам относятся химико-минеральный состав грунта, гранулометрический состав (дисперсность), плотность-влажность грунта, состав обменных катионов и концентрация электролита порового раствора, его рН и др. К внешним факторам относятся температура и давление, параметры внешнего электрического поля и др. (Хомутинников, 2020).

В ходе исследования структур глинистых грунтов различного типа В.А. Королёвым было выяснено, что вследствие электроосмотического осушения микроструктура глины на аноде становится однородной и плотной, характеризуется тонкими и мелкими порами. В катодной же зоне напротив микроструктура более рыхлая, существуют заполненные водой крупные поры, также прослеживается псевдотурбулентная структура вследствие электроосмотического потока.

Таким образом, 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 (Королёв, 2015).

Под **электрофорезом** понимают явление перемещения заряженных частиц дисперсной фазы относительно неподвижной дисперсионной среды под действием внешнего электрического поля к одному из электродов (рис.6). Электрофорез может происходить только в седиментационно устойчивых ультрамикрорегетерогенных или микрогетерогенных свободнодисперсных системах с жидкой или газообразной дисперсионной средой (Клындюк, 2011).

Вследствие воздействия внешнего электрического поля происходит разрыв ДЭС в структуре частиц дисперсной фазы по плоскости скольжения, в результате чего отрицательно заряженные частицы глины приобретают способность двигаться к положительному электроду (Клындюк, 2011).

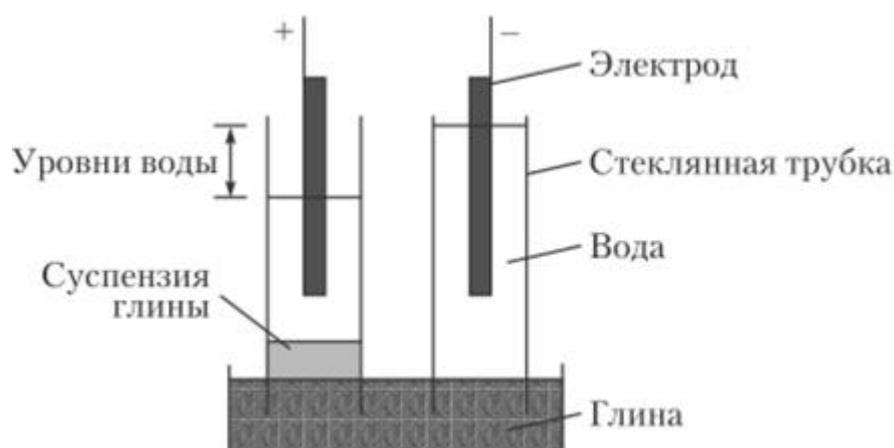


Рис.6 Электрофорез (Зайцев, 2015)

Такое перемещение фаз имеет место при невысокой концентрации электролита. При этом слой противоионов имеет диффузный характер, тем более резко выраженный, чем ниже концентрация электролита в растворе. Такое пространственное разделение заряда обуславливает ряд характерных свойств дисперсных систем, в частности, возникновение в них электрокинетических явлений. Увеличение концентрации электролитов, как правило, приводит к уменьшению скорости электрофоретического переноса коллоидных частиц, то есть к уменьшению абсолютной величины электрокинетического потенциала, причем воздействие электролитов выражено тем более резко, чем выше заряд противоионов (Баранов, Фролов, 2002).

Основными условиями протекания электрофореза частиц в грунтах являются (Баранов, Фролов, 2002):

1. Наличие в грунте свобододисперсных заряженных частиц;
2. Наличие в грунте свободного порового пространства и относительно широких сообщающихся поровых каналов либо наличие свободной жидкой дисперсионной среды, в которой могла бы осуществляться электрофоретическая подвижность частиц;
3. Наличие внешнего электрического поля;

В случае электроосмоса воды через отрицательнозаряженную диафрагму катионы подвижной части ДЭС движутся со скоростью  $v_{эо}$  в сторону отрицательного электрода – катода, увлекая за собой и молекулы воды вследствие вязкого трения. При электрофорезе отрицательнозаряженная частица напротив стремится сместиться со скоростью  $v_{эф}$  (линейная скорость электрофореза) к противоположному положительному полюсу – аноду (Королёв, 2015).

**Электрокоагуляцией** называют 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. Большую роль в этом процессе также играет электрофорез частиц, под действием которого усиливается соударение частиц и образование агрегатов (*Королёв, 2015*).

Процесс электрокоагуляции можно разделить на 2 этапа:

1. Сближение частиц, которые находятся на некотором расстоянии друг от друга;
2. Слипание частиц на близком расстоянии.

При наложении внешнего электрического поля обе стадии изменяются: за счет электрофореза частицы сближаются у одного из электродов, что создает условия для протекания второй стадии – их активной коагуляции. Во внешнем электрическом поле происходит деформирование ДЭС, а нарушение его симметрии способствует увеличению эффективности соударения частиц (*Королёв, 2015*).

Из всего вышперечисленного можно сделать вывод о том, что воздействие постоянного электрического поля является причиной протекания электрокинетических процессов и оказывает непосредственное влияние на грунты, а именно на их состав, свойства, структуру и текстуру.

## Глава 2. Явление коррозии и электрохимическая защита

### 2.1 Общие положения

Явление коррозии обуславливается самопроизвольным разрушением металлов вследствие взаимодействия их с окружающей средой. Коррозию металлов можно классифицировать по механизму и условиям протекания процесса и характеру коррозионного разрушения. По механизму выделяется два основных вида протекания коррозии: химический и электрохимический (рис.7).

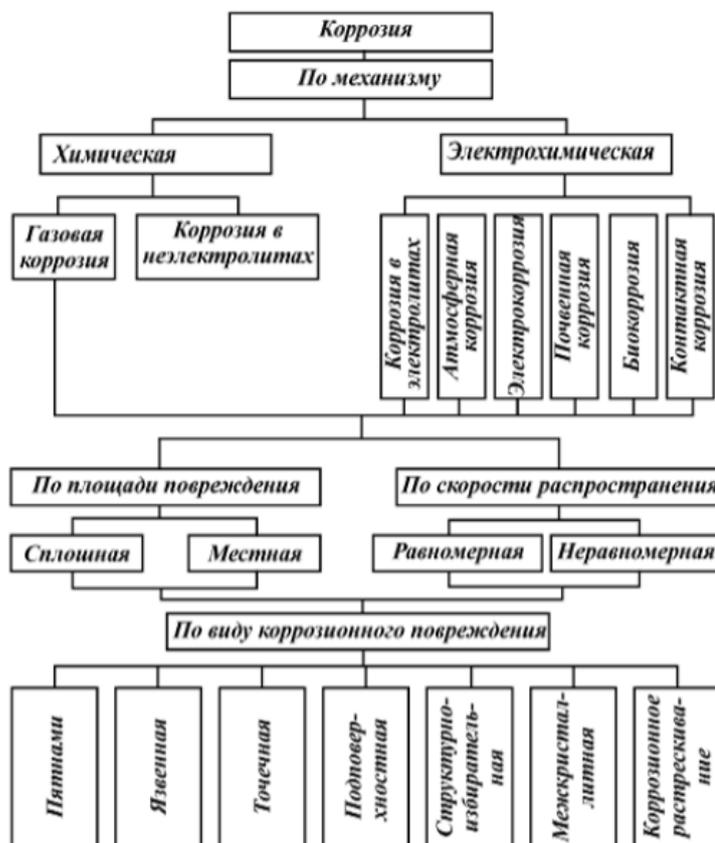


Рис.7 Виды коррозии (Основы электрохимической..., 2016)

*Химическая коррозия* подчиняется законам химической кинетики гетерогенных реакций. При данном типе коррозии электрический ток не возникает и не протекает, а продукты коррозии образуются на всех поверхности корродирующего металла. Таким образом, при химической коррозии металлы взаимодействуют с неэлектролитами и в результате металл окисляется одновременно с восстановлением окислительной компоненты коррозионной среды. Выделяют газовую коррозию и коррозию жидких агрессивных сред (Бурлуцкий, Еремеева, 2020).

Под *электрохимической коррозией* понимают разрушение металла в результате электрохимического взаимодействия с коррозионной средой (раствором электролита).

Коррозионной средой являются водные растворы солей, кислот, щелочей, морскую воду, атмосфера влажного газа, почвы (*Основы электрохимической..., 2016*).

Электрохимическая коррозия в отличие от химической характеризуется образованием и протеканием электрического тока, т.е. происходит передвижение ионов металла и ионов электролита от одного участка к другому (*Основы электрохимической..., 2016*).

В ходе электрохимической коррозии корродирующая поверхность дифференцируется на анодную и катодную зону, при этом разрушение металла происходит в основном на анодных участках металлических сооружений (рис.8) (*Бурлуцкий, Еремеева, 2020*). В результате электрохимической коррозии одновременно протекают две реакции – окисления и восстановления.

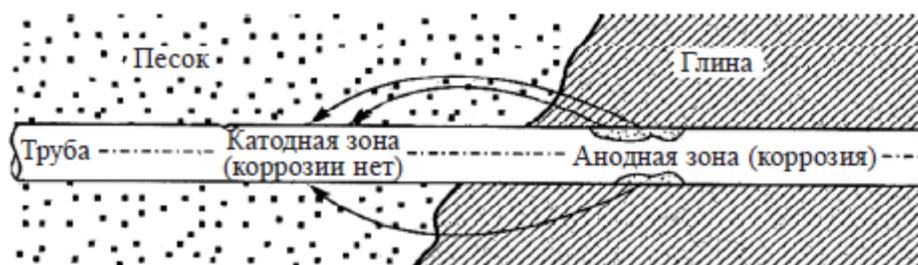


Рис.8 Дифференциация участка трубопровода на катодную и анодную зоны (*Теория и технология, 2016*)

Вид коррозионной среды может быть различным: электролиты водных растворов, солей, щелочей кислот, морская вода; атмосфера влажного газа, грунты. Вследствие этого выделяются основные виды коррозии:

- **Почвенная, или подземная, коррозия** металлических сооружений, расположенных под землей.
- **Атмосферная** (в воздушной и влажной газовой среде)
- **Биологическая коррозия**, которая протекает вследствие жизнедеятельности микроорганизмов.
- **Внутренняя** (внутренняя поверхность трубопроводов).
- **Блуждающими токами.**
- **Коррозия в растворах электролитов.**

К дополнительным видам коррозии относят контактную коррозию, радиационную коррозию и коррозию в условиях механического воздействия (коррозионное растрескивание, усталость, кавитация, эрозия и фреттинг-коррозия) (*Основы электрохимической..., 2016*).

На поверхности находящегося в электролите металла возникают короткозамкнутые гальванические элементы, и для того, чтобы гальванические

элементы работали, на поверхности металла необходимо выделение катодных и анодных участков, которые в свою очередь обладают разными значениями потенциалов. Таким образом, говорят об электрохимической гетерогенности (неоднородность поверхности).

Электрохимическая неоднородность может возникнуть по разным причинам. Например (Мальцева, 2000):

- Неоднородность металлической фазы – наличие макро- или микровключений, различная концентрация твердого раствора, неодинаковая степень обработки поверхности металла и т. д.;
- Неоднородность защитных пленок на поверхности металла – наличие несплошных окисных пленок, пористость защитных пленок, неравномерное распределение на поверхности продуктов коррозии (соли и гидроксиды);
- Неоднородность внутренних напряжений в металле;
- Неоднородность жидкой фазы – различие в концентрациях собственных ионов металла в электролите, различных солей, ионов водорода, кислорода и других окислителей;
- Неоднородность физических условий – различие температур на участках поверхности металла, неравномерное распределение внешнего электрического поля, неодинаковая освещенность поверхности металла и др.

Коррозии чаще всего подвергаются металлы, которые содержат примеси других металлов и неметаллических веществ (Мухин, 2004). Как уже говорилось ранее, при протекании коррозии происходит разделение поверхности металла на катодную и анодную зону. Таким образом, поверхность корродирующего металла представляет собой гальванический элемент, состоящий из электродов с различными потенциалами. Электрод с наиболее положительным потенциалом является катодом, с наиболее отрицательным – анодом (Мальцева, 2000).

В свою очередь, *анодный процесс* – переход ионов металла в раствор в виде гидратированных ионов и образование некомпенсированных электронов на анодных участках по следующей схеме (Мальцева, 2000):



*Катодный процесс* – ассимиляция электронов находящимися в растворе ионами или молекулами, т.н. деполаризаторами, способными к восстановлению на катодных участках:



На схеме наблюдается перетекание некомпенсированных ионов от анодного участка металла к катодному (рис.9).

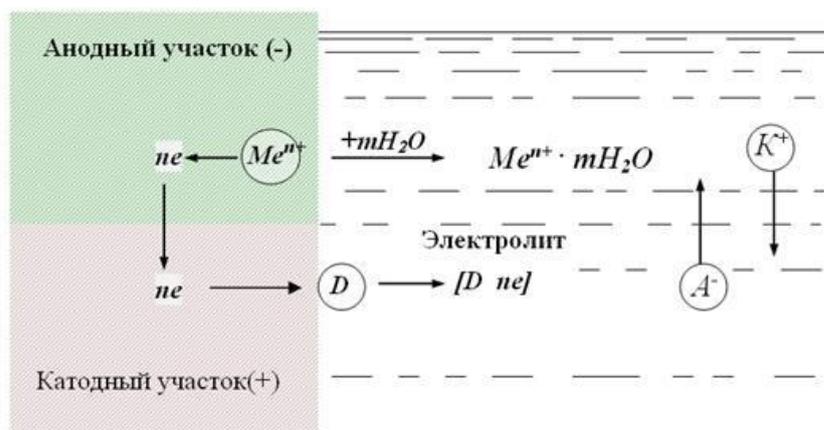


Рис.9 Схема электрохимической коррозии (Познайка.Орг, 22.03.2022)

При электрохимической коррозии металлов преимущественно протекают следующие катодные реакции:

В большинстве случаев электрохимической коррозии металлов наибольшее значение имеют катодные реакции – кислородная деполяризация и водородная деполяризация (деполяризация водородными ионами) (Антропов Л.И. и др, 1981).

Данные реакции поляризации протекают по следующим схемам:

1. Кислородная деполяризация:

- в кислотной среде при  $\text{pH} < 7$   $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} = 4\text{OH}^-$
- в нейтральной и щелочной среде при  $\text{pH} \geq 7$   $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} = 4\text{OH}^-$

2. Водородная деполяризация  $\text{H}^+ + \text{e} = 1/2 \text{H}_2$ .

Коррозией металлов с кислородной деполяризацией называют процесс коррозии, при котором на катодной зоне происходит восстановление (ионизация) растворенного в электролите кислорода. Именно такой коррозионный процесс является самым распространенным.

В ходе электрохимической коррозии металлов в нейтральных электролитах, протекающей с кислородной деполяризацией, повышение температуры снижает перенапряжение ионизации кислорода и ускоряет диффузию кислорода к поверхности корродирующего металла, но уменьшает растворимость кислорода (Жук, 1976). В свою очередь перенапряжением кислорода называется возникающая при ионизации кислорода на катоде поляризация.

Таким образом, общая скорость коррозионного процесса при кислородной деполяризации определяется скоростью поступления кислорода из воздуха к катодной поверхности и значением перенапряжения кислорода (Клинов, 1950).

Коррозия с водородной деполяризацией есть коррозия металлов, при которой катодная реакция осуществляется с выделением водорода. Водородная деполяризация имеет ряд отличий от кислородной. В первую очередь, водородная деполяризация медленнее. Замедленность катодного процесса значительно влияет на скорость коррозии металлов с водородной деполяризацией. Во-вторых, имеет большую зависимость от водородного показателя среды (Жук, 1976). А также потенциалы водородной деполяризации больше смещены в отрицательную сторону. И несколько других особенностей, таких как: протекание процесса с ускорением, большая зависимость скорости коррозии от адсорбции на корродирующем металле и др. (Жук, 1976).

В действительности сопротивление процессу восстановления иона водорода, при котором к нему присоединяется электрон, способствует возникновению активационной поляризации (Валашковский, 1978). Эту возникшую поляризацию называют перенапряжением водорода, а сам процесс идет с т.н. кинетическим контролем. Диффузионный контроль осуществляется при диффузии водорода к катоду, а в случае, когда процесс идет и с ионизацией, и с диффузией водорода, говорят о диффузионно-кинетическом контроле. Аналогия с кинетическим, диффузионным и диффузионно-кинетическим контролем проводится так же для перенапряжения ионизации кислорода

Кислородная и водородная деполяризация могут протекать параллельно, однако часто данные типы электрохимической коррозии накладываются друг на друга, соответственно, происходит протекание процесса со смешанной водородно-кислородной деполяризацией (Антропов Л.И. и др, 1981).

## **2.2 Коррозионная активность грунта**

Существенное влияние на скорость подземной коррозии оказывают следующие характеристики грунта: тип, гранулометрический состав, влажность, воздухопроницаемость, водородный показатель грунтового раствора, удельное электрическое сопротивление, растворенные в подземных вода соединения, температура среды, наличие микроорганизмов.

В природе встречаются высокоррозионные, среднекоррозионные и низкоррозионные грунты. Песчаные, глинистые, торфянистые *типы грунтов* обладают высокой коррозионной активностью. В эту категорию относят насыпные грунты, так как они неоднородны и имеют множество различных включений, а также лёссовые (Бурлуцкий, Еремеева, 2020).

Твердая компонента грунта непосредственно на коррозионном процессе не отражается, однако она может оказывать влияние на физико-механические свойства грунта, главным образом на пористость (*Теория и технология...*, 2016). Характер, расположение и плотность упаковки зерен так же могут иметь значение. Учеными было обнаружено, что скорость коррозии стали в глине в 5-7 раз ниже, чем в песчаных грунтах, однако глубина коррозионного поражения в глинистых почвах значительно больше, что объясняется образованием макрогальванических пар дифференциальной аэрации (*Красноярский, Ларионов, 1962*).

Влажность грунта является существенным фактором для протекания коррозии. Увеличение влажности приводит к ускорению протекания анодного процесса (диффузии ионов металла), одновременно замедляя катодный процесс и снижая сопротивление электролита. После этого скорость коррозии начинает снижаться вследствие чрезмерной влажности, уменьшающей притока кислорода к металлической конструкции. Величина влажности также влияет на удельное электрическое сопротивление и концентрацию растворенных веществ в грунтовом электролите.

Для суглинков и глин для обеспечения возможности коррозии бывает достаточно 10—12% влажности (к весу сухой почвы) (*Притула, 2003*). В грунтах, обладающих влажностью 12-25%, наблюдается максимальная скорость электрохимической коррозии (рис.10) (*Мальцева, 2000*). При этом значении влажность дает большое, но еще не максимальное насыщение почвы водой. Затем происходит насыщение грунтов до такой степени, что вода образует сплошной слой, препятствующий поступлению воздуха к металлу, и, соответственно, скорость коррозии замедляется (*Притула, 2003*).

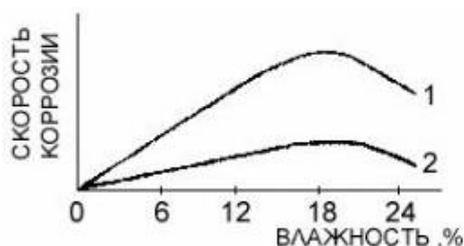


Рис.10 Влияние влажности грунта на скорость коррозии металла: 1 – в песке, 2 – в глине (*Мальцева, 2000*)

Воздухопроницаемость напрямую зависит от влажности грунта и является следствием особенностей состава, плотности, колебания грунтовых вод и др. Повышение воздухопроницаемости ведет к ускорению протекания коррозионных процессов. Необходимо отметить роль неравномерности аэрации поверхности металлической конструкции. Катодные процессы будут протекать на участках с

большой воздухопроницаемостью, в свою очередь, анодные процессы – на участках с менее интенсивным поступлением кислорода. В результате этого образуется так называемая гальваническая аэрационная макропора (Красноярский, Ларионов, 1962).

Стоит отметить, что с ростом воздухопроницаемости коррозия может усиливаться, однако, при поступлении кислорода «в избытке» наступает торможение коррозии (Притула, 2003).

По водородному показателю выделяется несколько сред: сильнокислые (<3-4,3), кислые (4,3-5,5), слабокислые (5,5-6,5), нейтральные (6,5-7,0), слабощелочные (7,0-7,5), щелочные (7,5-9) и сильнощелочные (>9-10). В сильнокислых средах скорость резко возрастает, а с ростом pH скорость коррозии убывает вплоть до прекращения при показателях равных 13 (рис.11) (Чухарева и др., 2019).

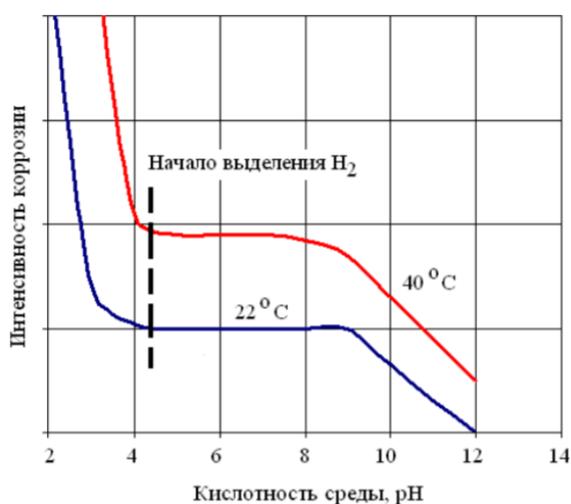


Рис.11 Зависимость интенсивности коррозии от pH и температуры (Чухарева и др., 2019)

Для определения границ термодинамической устойчивости соединений и возможности протекания реакций бельгийский ученый М. Пурбе предложил представить данные в виде диаграмм. В диаграммах Пурбе в системе металл-вода учитывается 3 типа равновесий: равновесный обмен электрическими зарядами; ионно-молекулярные равновесия связанные с pH; равновесия, зависящие и от потенциала, и от pH среды (Информационный..., 15.04.22). Таким образом, по диаграмме можно определить будет ли устойчив тот или иной металл и какие соединения он образует в зависимости от величины потенциала и pH среды (рис.12).

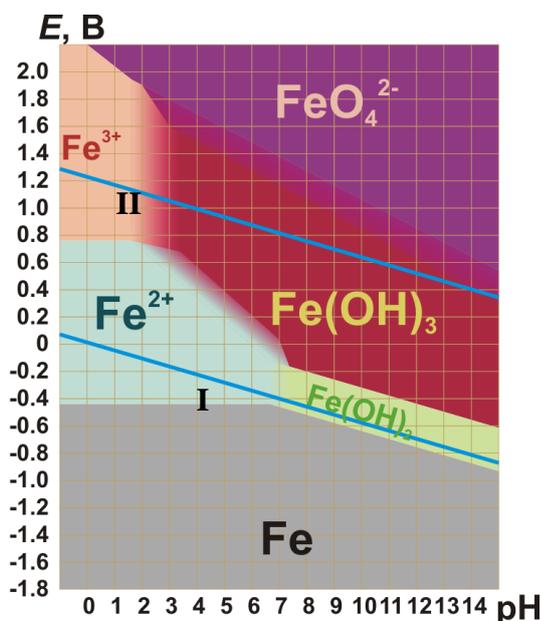


Рис.12 Диаграмма Пурбе для системы железо-вода:

I - равновесный потенциал водородного электрода в зависимости от pH,

II - равновесный потенциал кислородного электрода.

Удельное электрическое сопротивление ( $\rho$ ) оказывает прямое влияние на скорость коррозии. Чем удельное электрическое сопротивление меньше, тем выше коррозионная агрессивность грунта.

На удельное сопротивление влияют следующие факторы: тип и влажность грунта, растворенные соли, воздухопроницаемость, погодные условия и др. Большее удельное сопротивление у сухих и маловлажных грунтов. При увеличении влажности удельное сопротивление заметно угасает, однако при замерзании влаги грунта сопротивление резко возрастает.

Таким образом, можно судить о коррозионной активности среды в зависимости от удельного электрического сопротивления, а так же проследить связь удельного сопротивления и средней плотности катодного тока согласно ГОСТу 9.602–2016 (табл.1).

**Таблица 1**

Плотность катодного тока в зависимости от УЭС грунта

Коррозионная активность	Удельное сопротивление грунта, Ом*м	Средняя плотность катодного тока, А/м <sup>2</sup>
Низкая	>50	<0,05
Средняя	20-50	0,05-0,20
Высокая	<50	>0,20

Состав и концентрация веществ в составе подземных вод определяет агрессивность коррозионной среды. Засоленность грунтов является одним из факторов,

который определяет удельное электрическое сопротивление и коррозионную активность среды, однако коррозия может протекать и в малозасоленных почвах. Состав и концентрация солей сказываются на способности высыхания и растрескивания почвы, что в свою очередь приводит к увеличению притока кислорода к отдельным участкам металлического сооружения, вследствие чего происходит возникновение коррозионных гальванических пар (*Притула, 2003*).

Таким образом, состав, содержание и минерализация солей, кислот, щелочей, а также других соединений, растворенных в грунтовых водах, имеют непосредственное влияние на агрессивность среды. Например, высокое содержание хлоридов приводит к затруднению образования защитных пленок на поверхности металла. Суммарное содержание  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  более 300 мг/л указывает на высокую коррозионную активность среды. Для свинца опасно присутствие в грунтах органических и азотистых веществ, а для алюминия — растворов хлоридов (*Подгорный, 1987*).

В таблице 2 представлена коррозионная активность грунтов и грунтовых вод по отношению к углеродистой стали в зависимости от их химического состава (*Стрижевский, 1981*).

**Таблица 2**

Коррозионная активность грунтов и грунтовых вод по отношению к углеродистой стали в зависимости от их химического состава

рН	Содержание				Коррозионная активность
	Серы, %	Хлора, %	$\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ в воде, мг/л	$\text{CO}_2$ , мг/л	
6,5...8,5	<0,1	<0,02	<100	0	Низкая
8,5...14	0,1...0,2	0,02...0,05	100...200	0	Средняя
6,0...6,5	0,2...0,3	0,05...0,1	200... 300	<5	Повышенная
<6,0	>0,3	>0,1	>300	>5	Высокая

Изменение *температуры* может оказывать большое влияние на скорость коррозии. Повышение температуры приводит к увеличению скорости движения ионов, что в свою очередь ускоряет анодные и катодные процессы.

Роль бактерий в процессе коррозии может быть весьма значительной, ведь живущие в грунтах *микроорганизмы* могут вызвать биокоррозию металла. В грунтах встречаются как аэробные бактерии, жизнедеятельность которых протекает в грунтах, так и анаэробные, деятельность которых протекает в условиях затрудненного газообмена (*Красноярский, Ларионов, 1962*). Высокое значение имеют анаэробные сульфат-восстанавливающие бактерии, которые восстанавливают сульфаты до сульфидов.

### 2.3 Последствия коррозии и защита от неё

Трубопроводы, как и другие подземные металлические сооружения, подвержены процессам коррозии, что приводит к уменьшению срока их эксплуатации. Коррозия трубопроводов является довольно медленным процессом, однако, она может привести к множеству негативных, в некоторых случаях необратимых, последствий.

Выделяются наружная (атмосферная или почвенная) и внутренняя коррозии, которые могут протекать как по отдельности, так и совместно. Наружная коррозия может проявляться в виде язв, каверн, пятен, точечных, а также других повреждений различной глубины вплоть до сквозных. Основной вид внутренней коррозии – равномерная или общая, которая происходит в результате окислительно-восстановительных процессов на поверхности раздела фаз (*Чухарева и др., 2019*).

В дополнение необходимо отметить такой процесс как коррозионное растрескивание под напряжением, которое вызвано совместным воздействием растягивающего напряжения и коррозионной активности среды и проявляется в виде транс- и межкристаллических трещин или снижения порога усталости металла (*Бурлуцкий, Еремеева, 2020*).

Таким образом, процессы коррозии приводят к разрушению трубопроводов изнутри, уменьшению времени между профилактическими осмотрами магистралей и ремонта; дополнительные затраты на замену оборудования и труб (*НЕФТЕГАЗ 2022, 15.04.2022*).

Беря во внимание вышеизложенные факты, металлические конструкции необходимо защищать от коррозии, снизив скорость её протекания различными методами, которые будут выбираться согласно их эффективности и экономической целесообразности.

Защиту можно разделить на активную, пассивную и комплексную. Методы защиты от электрохимической коррозии зависят от способа их применения, а также механизма защиты. По механизму выделяются следующие методы (*Мальцева, 2000*):

1. Торможение катодного процесса
2. Торможение анодного процесса
3. Увеличение омического сопротивления системы
4. Уменьшение термодинамической нестабильности коррозионной системы
5. Смешанные методы, которые приводят к торможению нескольких стадий коррозионного процесса

По способу применения защиты от электрохимической коррозии можно выделить несколько типов:

1. Защитные покрытия: металлические и неметаллические.

Основная цель защитных покрытий заключается в изоляции сооружения от агрессивной среды. Вдобавок, применение металлических защитных покрытий приводит к уменьшению термодинамической нестабильности. По способу нанесения металлические покрытия делятся на гальванические, наносимые электрохимическим методом, и горячедиффузные, наносимые физико-механическим методом. Неметаллические – на органические (битумы, полимеры, лакокраски) и неорганические покрытия (эмалевые, оксидные, фосфатные) (Мальцева, 2000).

2. Коррозионностойкие материалы.

Процесс легирования металла происходит с применением никеля, хрома марганца, алюминия, кремния, вольфрама. В результате чего на поверхности защищаемого металла образуется оксидная пленка, которая устойчива к процессам коррозии.

3. Обработка коррозионной среды включает в себя внесение ингибиторов и чистку среды от агрессивных агентов. Замедление процесса коррозии происходит путём адсорбции ингибиторов с корродирующей поверхности, также вследствие удаления деполяризатора (например, кислорода) из среды.

4. Электрохимическая защита.

Данный тип защиты играет существенную роль в борьбе с коррозией. Выделяются протекторная, дренажная, анодная и катодная электрохимические защиты.

На схеме наглядно показано процентное соотношение способов защиты металлических конструкций от коррозии (рис.13)

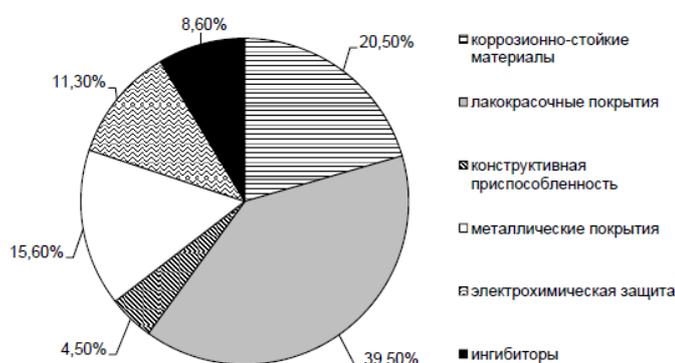


Рис.13 Процентное соотношение способов защиты металлоконструкций от коррозии (Основы электрохимической..., 2016)

Протекторная защита является автономным способом защиты от коррозии, которому не требуется постоянный источник электроэнергии. Данный тип защиты реализуется благодаря использованию гальванических анодов, в качестве которых выступают металлы с более отрицательным по сравнению с защищаемым сооружением потенциалом (*Нефтегаз-2022, 09.04.22; Бурлуцкий, Еремеева, 2020*)

Принцип дренажной электрохимической защиты заключается в устранении анодных зон путём отвода блуждающих токов из анодной зоны в рельсовую сеть пористость (*Теория и технология..., 2016*).

Анодная защита применяется в случаях, когда необходимо защитить сооружение, контактирующее с сильноагрессивной жидкой средой. При применении данной защиты в результате анодной поляризации происходит пассивация металла (образование на поверхности металла оксидной плёнки).

Наиболее популярным и эффективным методом электрохимической защиты является **катодная защита**. Принцип катодной защиты заключается в поляризации металла с помощью внешних источников постоянного тока, при применении которой происходит затухание скорости коррозии. Катодная поляризация возникает при смещении потенциала металла в отрицательную сторону по отношению к потенциалу коррозии и зависит от силы защитного тока (*Бурлуцкий, Еремеева, 2020*).

Осуществление катодной защиты производится благодаря установке катодной защиты (УКЗ), которая включает в себя (рис.14):

1. Станцию катодной защиты (СКЗ), которая является источником постоянного тока;
2. Анодное заземление, изготовленное из стали, чугуна, графита или железокремнистых сплавов;
3. Контрольно-измерительный пункт точки дренажа (КИП);
4. Кабель, положительный полюс которого присоединяется к анодному заземлителю, а отрицательный – к защищаемой конструкции;
5. Электрод сравнения (медно-сульфатный, насыщенный каломельный, хлорсеребряный);

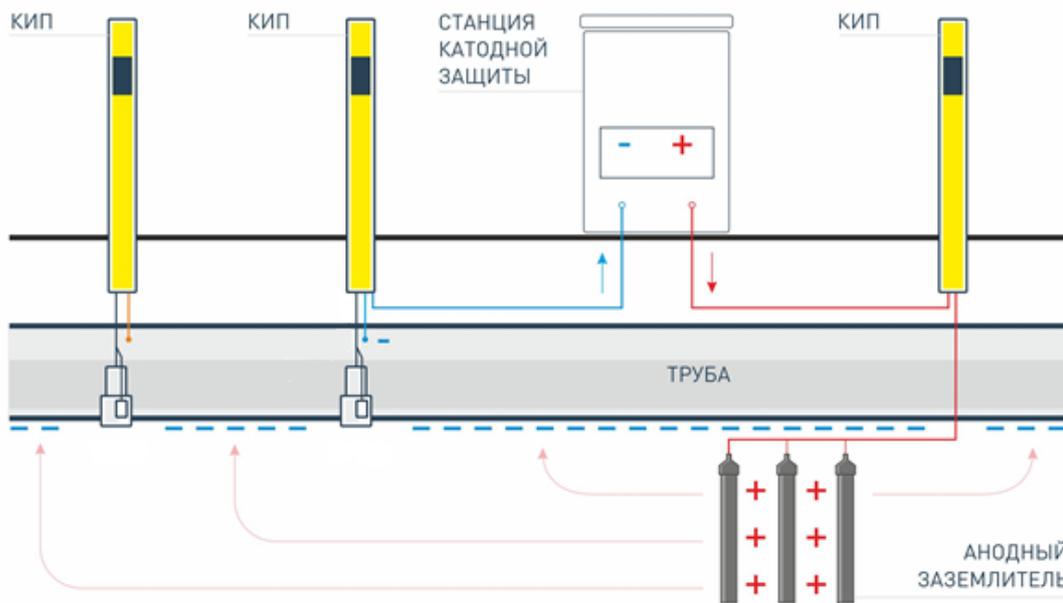


Рис.14 Схема катодной защиты подземного однониточного трубопровода (Станки-лэнд, 09.04.22)

Расстановка СКЗ должна быть такой, при которой будет обеспечиваться регламентированная величина плотности катодного тока, и осуществляться контроль над ним.

Анодные заземления необходимы в целях создания постоянного контакта положительного полюса источника тока с токопроводящей средой, окружающей сооружение. Переходное сопротивление, зависящее от УЭС грунта, и срок службы являются важными параметрами при оценке эксплуатации заземлителей. Электроды для данных устройств могут быть растворимыми (сталь, серый чугун), малорастворимыми (графит) и нерастворимыми (сплавы платины, свинца с серебром).

Околоэлектродное пространство заполняется коксовыми или коксографитовыми засыпками с целью создания электропроводимости в системе электрод-засыпка и снижения расхода анодного материала и сопротивления растеканию тока заземления. При работе анодного заземлителя в приэлектродном слое снижается водородный показатель pH, что в свою очередь ускоряет анодное растворение. Для решения данной проблемы в коксовую засыпку добавляются щелочные ингибиторы (Бурлуцкий, Еремеева, 2020).

При запуске УКЗ, стекающий с анодного заземления ток, стремительно направляется по грунтам к металлическому сооружению и натекает на него, вследствие чего происходит поляризация его металла.

В условиях изменчивости параметров коррозионной среды и потенциала сооружения, защита осуществляется установками автоматической катодной защиты. Эти

установки представляют собой преобразователи, снабженные специальными блоками, обеспечивающими в зависимости от изменения потенциала, сооружения автоматическое регулирование электрических параметров защиты. Посредством регулировки тока или напряжения автоматическая установка катодной; защита поддерживает потенциал между защищаемым сооружением и окружающей средой в заданных пределах (Бурлуцкий, Еремеева, 2020).

Обращаясь к диаграмме Пурбе, которая была представлена выше (рис.12), необходимо отметить, что катодная защита стали в дефектах покрытия обеспечивается, когда её потенциал находится в области термодинамической устойчивости, и эффективна даже при высоких значениях плотности катодного тока и высоком показателе рН (Яблучанский, 2016).

Сила натекающего на сооружение тока напрямую влияет на степень поляризации металла, что в свою очередь сказывается на защищенности металлической конструкции. На защищаемое сооружение необходимо подавать такой ток, чтобы создаваемый потенциал находился в регламентированном диапазоне максимальных и минимальных значений. Для различных типов коррозионной среды требуется разная защитная плотность тока (табл. 3).

**Таблица 3**  
Защитная плотность тока в зависимости от типа грунта (Стрижевский, 1981)

Тип коррозионной среды	Защитная плотность тока $j_{кз}$ , мА/м <sup>2</sup>
Стерильный нейтральный грунт (почва)	4,3 – 16,1
Хорошо аэрируемый нейтральный грунт	21,5 – 32,3
Сухой, хорошо аэрируемый грунт	5,4 – 16,1
Влажный грунт	16,9 – 64,6
Высокоокислый грунт	53,8 – 161,4
Почва, поддерживающая активность сульфатвосстанавливающих бактерий	451,9
Грунт с подогревом (например, трубопроводы сброса горячей воды)	53,8 – 269

Катодная защита подземных стальных трубопроводов должна выполняться таким образом, чтобы поляризационные потенциалы  $\phi_n$  стали трубы, который указывает на термодинамическую возможность протекания коррозии или защиты, относительно электрода сравнения находились в диапазоне от -0,85 В до -1,15 В (Яблучанский, 2016).

В результате многочисленных полевых и лабораторных исследований было установлено, что скорость коррозии стали  $K_{кор}$  определяется плотностью тока коррозии  $j_{кор}$  или потенциалом коррозии  $\phi_{кор}$ , которые контролируются условиями доставки

кислорода к сооружению. Максимальная же скорость коррозии  $K_{\max}$  будет достигаться в том случае, когда плотность тока коррозии будет приближаться к плотности предельно возможного тока по кислороду  $j_{\text{пр}}$  (Яблучанский, 2016). Скорость остаточной коррозии  $K_{\text{ост}}$  стали в разных грунтах будет меняться в довольно большом диапазоне, но при условии, что величина поляризационного потенциала  $\varphi_{\text{п}}$  будет оставаться в одних величинах.

Процесс катодной поляризации стали и сопутствующие электрохимические реакции показывают: начало реакции катодного разложения воды с выделением водорода свидетельствует о подавлении коррозионного процесса, когда плотность тока катодной защиты  $j_{\text{кз}}$  достигает значение плотности тока коррозии  $j_{\text{кор}}$ . Величина поляризационного потенциала  $\varphi_{\text{п}}$ , при котором начинается выделение водорода, зависит от величины потенциала коррозии  $\varphi_{\text{кор}}$ , определяемого минеральным и гранулометрическим составом грунтов и их влажностью (Яблучанский, 2016).

Таким образом, противокоррозионная защита (ПКЗ) магистральных трубопроводов применяется с целью замедления скорости коррозии защищаемых объектов для предотвращения коррозионных угроз. Система коррозионного мониторинга (СКМ), входящая в состав ПКЗ, формирует исходные данные для определения текущего состояния системы противокоррозионной защиты, уровня коррозионных угроз и определения оптимальных параметров ПКЗ (Яблучанский, 2016).

### Глава 3. Геоморфологические и геологические условия

Область исследования охватывает несколько участков различных газопроводов в Ленинградской области. Отбор грунтов с целью дальнейшего изучения их физико-химических характеристик производился в 2-х направлениях от г. Санкт-Петербурга – в юго-западном и северо-восточном в рамках преддипломной производственной практики.

Таким образом, грунты естественного сложения отбирались в Ломоносовском районе Ленинградской области на двух участках газопровода Петродворец-Кипень (в дальнейшем – участки №1 и №2) и одном на участке во Всеволожском районе, расположенном к северо-востоку от Санкт-Петербурга, у газопровода Конная Лахта (в дальнейшем – участок №3) (рис.15).

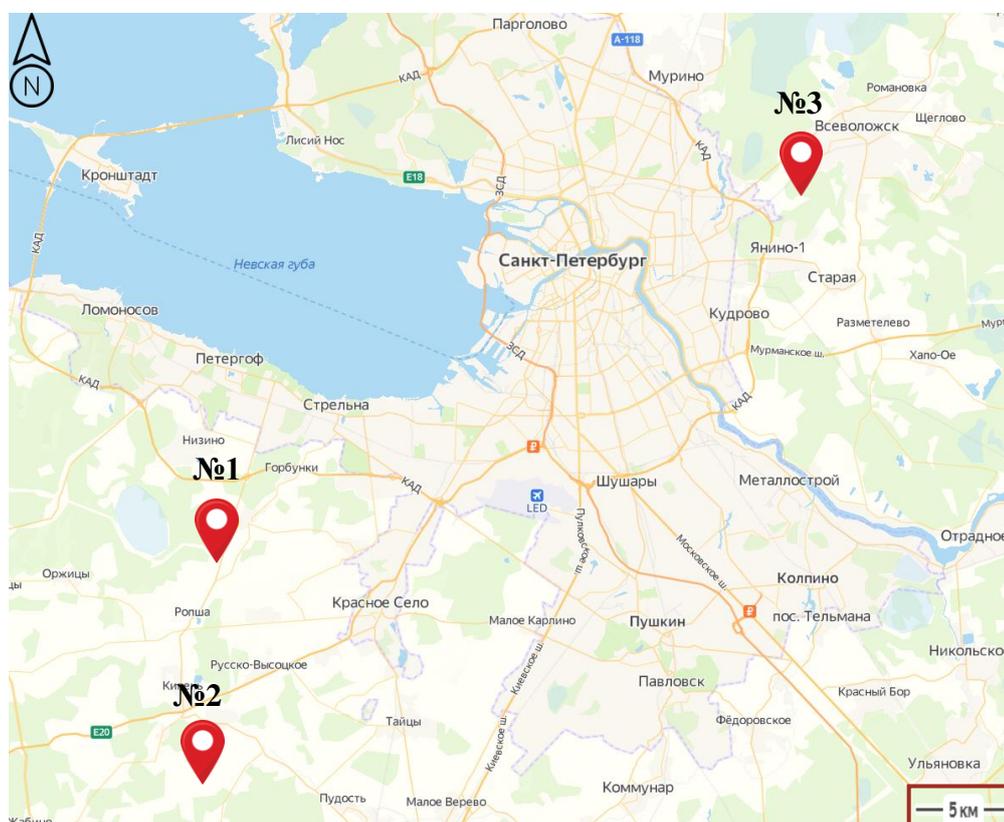


Рис.15 Фрагмент карты Санкт-Петербурга и Ленинградской области (Яндекс.Карты, 06.04.22)

Территория Санкт-Петербурга и Ленинградской области расположена на сочленении Балтийского кристаллического щита архей-протерозойского возраста и Русской (Восточно-Европейской) платформы, состоящей из древних осадочных пород (рис.16). Сверху на них настилаются четвертичные образования техногенного, аллювиального, болотного, озёрно-ледникового, флювиогляциального и морского происхождения (рис.17).



Рис.16 Геологическая карта Ленинградской области (Исаченко, 1991)

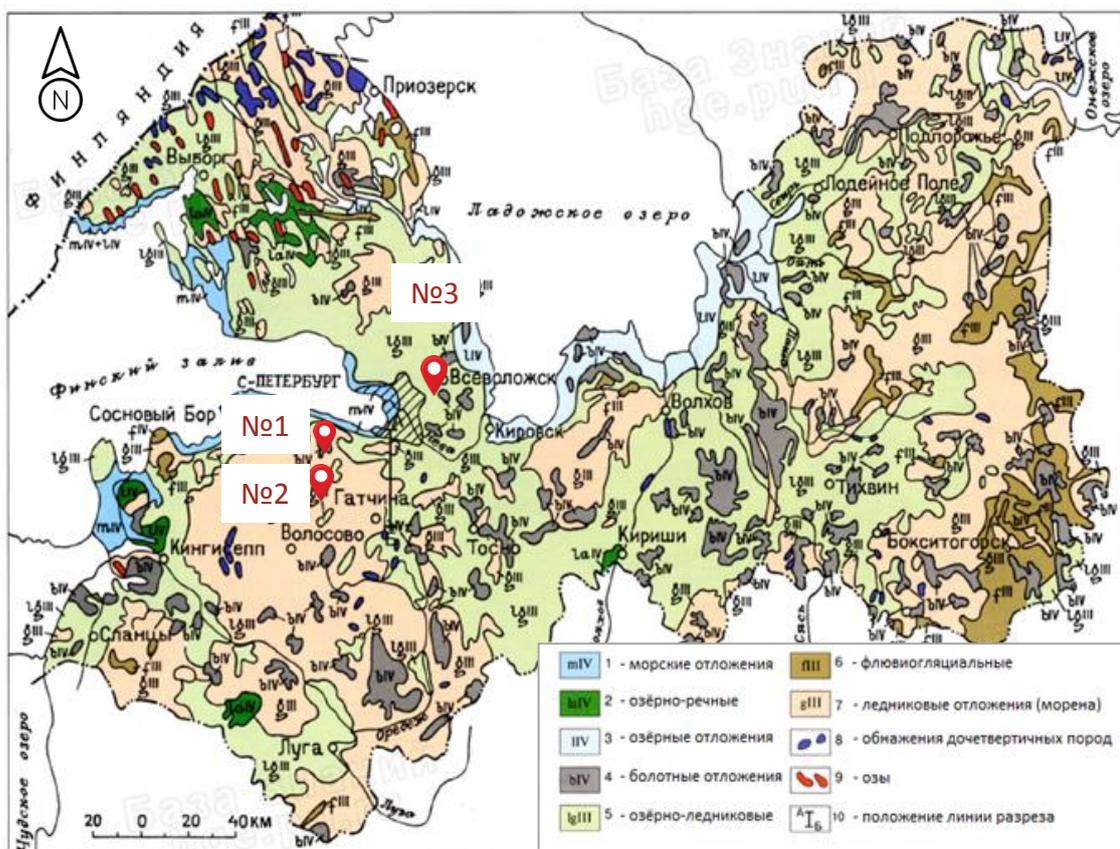


Рис.17 Северо-западная часть карты четвертичных отложений Санкт-Петербурга и Ленинградской области (По И.И. Краснову)

Почти весь современный ландшафт Санкт-Петербурга и Ленинградской области создан ледниками четвертичного периода. В течение четвертичного времени Земля неоднократно подвергалась оледенениям и сопутствующим процессам морской и флювиогляциальной деятельности, а так же водной и ветровой эрозиям. Выделяется 4 оледенения: Окское, Днепровское, Московское, Валдайское. С каждым последующим оледенением ледники занимали меньшую площадь и обладали более суровыми климатическими условиями (Багрова, 2021).

Ледниковые и водно-ледниковые отложения, представленные моренами, валунными и безвалунными песками, супесями, суглинками и глинами, почти полностью перекрывают территорию Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Мощность данных отложений может достигать нескольких десятков метров.

В результате оледенений ландшафт имеет разнообразие форм рельефа: полосы мощных моренных гряд, крутые песчаные холмы, длинные извилистые гряды, сложенные песком и гравием; остатки берегов озёр у границ оледенения, слоистые отложения глин и песков; глубокие и узкие ложбины, долины, по которым текли реки из ледниковых озёр (Багрова, 2021).

#### *Юго-запад Санкт-Петербурга*

Исследуемые на юго-западе участки в геоморфологическом отношении приурочены к Предглинтовой низменности (полоса с меняющейся от 9 до 20 км шириной). С севера данная полоса ограничена Приморской и Приневской низинами; с юга – глинтом, или Балтийско-Ладожским уступом, за которым следует Ижорская возвышенность, включающая в себя Ордовикское и Девонское плато (рис.18). Близкое залегание известняков и доломитов способствует вымыванию породы и развитию карста.

Низменность представлена комплексом аккумулятивных заболоченных террас, наклоненных к Финскому заливу и Ладожскому озеру. Абсолютные высоты данных террас варьируются в диапазоне от метров до нескольких десятков метров (Геология СССР, 1971).

#### *Северо-восток Санкт-Петербурга*

Участок, изучаемый к северу-востоку от города, относится к Приневской низине. Низменность охватывает долину реки Невы, включая её притоки (реки Ижора, Тосна) и другие реки (рис.18). Приневская низина представлена озёрно-ледниковыми террасами, сложенными песчаными и суглинистыми отложениями морены (Разумовский, 2007). Морена устилает дно низины и окружающие высоты, формируя

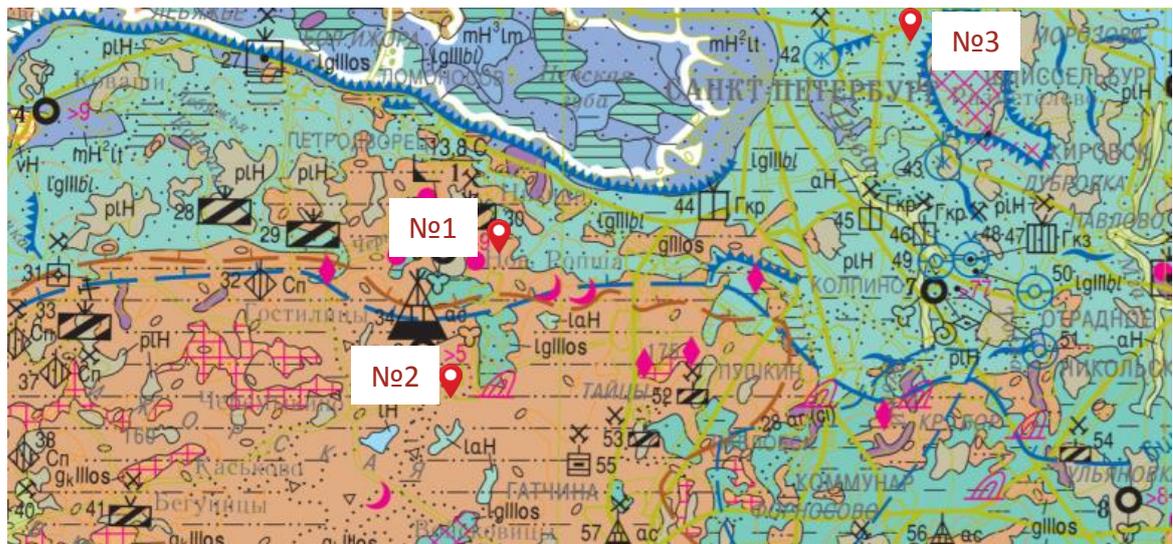
ровную поверхность – пенеплен – и подтверждая, что низина сформировалась еще до оледенения и имеет тектоническое происхождение (Багрова, 2021).



Рис.18 Орографическая схема Санкт-Петербурга и окрестностей  
(Геологический атлас Санкт-Петербурга, 2009)

На юго-западных участках четвертичные образования представлены верхнеплейстоценовыми бежево-коричневыми суглинками и супесями с линзами серо-синих глин (№1) и коричневыми суглинками с включениями супеси (№2) ледникового генезиса Осташковского горизонта Валдайского оледенения (gIIIos, gkIIIos). На северо-восточном участке (№3) четвертичный разрез представлен верхнеплейстоценовым гляциолимнием Балтийского ледникового озера - серо-зелеными глинами и темно-серыми суглинками (lgIIIbl).

На фрагменте карты четвертичных образований (лист О-36) можно подробнее проследить распространение четвертичных отложений различного генезиса на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области, включая участки исследования (рис.19).



lnH	Лимний нефелоидный. Алевропелиты, илы (до 7 м). Месторождения марганца (ЖМК)
laH	Озерно-аллювиальные отложения. Пески, алевриты, глины, супеси, суглинки (до 12 м)
plH	Болотные отложения (до 13 м). Торф. Месторождения торфа
vH	Эловые отложения. Пески (до 18 м)
mH³lm	Лимниевая пачка. Морские отложения. Пески, илы (до 2 м)
tH³	Техноген. Пески, разные грунты, суглинки, насыпи, отвалы, свалки (до 30 м)
mH²lt	Средняя часть. Литориновая пачка. Пески, алевриты, супеси, суглинки, алевропелиты (до 13,6 м). Месторождения песков строительных
lH¹an	Нижняя часть. Анциловая пачка. Лимний. Пески, суглинки, глины, диатомиты, алевриты, илы (до 11 м). Месторождения диатомитов, песков строительных
f.lgllms - lllos	* Московский—осташковский горизонты нерасчлененные. Флювиогляциальные и ледниково-озерные отложения. Пески, пески с гравием и галькой, супеси, суглинки, глины (до 20 м)
lgllbl	Гляциолимний Балтийского ледникового озера. Глины, глины ленточные, пески, пески с гравием и галькой, суглинки, супеси (до 25 м). Месторождения глин кирпичных
f.lglllos	Флювиогляциальные и ледниковоозерные отложения. Пески, гравийные пески, суглинки, алевриты, ленточные глины (до 30 м). Единичные находки алмазов
lglllos	Ледниковоозерные образования. Пески, глины, в том числе ленточные, суглинки, супеси, гравийно-галечные пески (до 45 м). Месторождения строительных песков, глин кирпичных и керамзитовых
gklllos	Ледниковые образования. Морена краевая. Валунные супеси, суглинки и глины, прослойки гравийно-галечного материала, оторженцы дочетвертичных пород (до 100 м)
glllos	Ледниковые образования. Морена основная. Валунные суглинки, супеси и глины, оторженцы дочетвертичных пород (до 50 м)

Рис.19 Фрагмент геологической карты четвертичных образований (лист О-36). Масштаб 1:1000000. (Кямяря, Мохов и др., 2012)

## Глава 4. Проведение исследования и результаты

### 4.1 Характеристика трубопроводов

В данной работе рассматриваются грунты 2-х магистральных газопроводов: Кипень-Петродворец (участки №1 и №2) и Конная Лахта (участок №3).

Магистральный газопровод Кипень-Петродворец (рис.22 и рис.23) построен из трубы диаметром 720 мм с толщиной стенки 9,5 мм; марка стали 17Г1С-У, изготовитель Челябинский трубопрокатный завод.

Система электрохимической защиты (ЭХЗ) на данном газопроводе введена в эксплуатацию в 1972 году. В качестве пассивной защиты газопровода от процессов коррозии используется мастичный тип изоляции. Значения потенциалов газопровода Кипень-Петродворец на участке №1  $U_{m-з} = -1,59$  В; на участке №2 –  $U_{m-з} = -1,82$  В.

Магистральный газопровод Конная Лахта построен из трубы диаметром 1220 мм с толщиной стенки 15,3 мм; марка стали 13Г1С-У, изготовитель Челябинский трубопрокатный завод.

Электрохимическая защита на газопроводе Конная Лахта (рис.24) введена в эксплуатацию в 1993 году. Пассивная защита от коррозии выполнена ленточным полимерным изоляционным покрытием трассового нанесения (лента «Поликен»). Грунты на протяжении трассы представлены суглинками. Удельное сопротивление колеблется в диапазоне от 13 до 4000 Ом·м, что говорит о высокой, средней и низкой степени коррозионной агрессивности грунтов по отношению к стали. Участки с высокой коррозионной опасностью на обследованном участке газопровода отсутствуют. Значения потенциалов на изучаемом участке газопровода Конная Лахта измеренные при шурфовке следующие:  $U_{max} = -0,94$ В,  $U_{min} = -4,41$  В,  $U_{cp} = -1,63$  В.

Режимы работы ближайших средств ЭХЗ (даны без точной привязки и номера):

1. Работает в автоматическом режиме работы стабилизации по защитному потенциалу со следующими значениями тока и напряжения:  $I = 2,7$  А,  $U = 18,1$  В, потенциал в точке дренажа  $-1,81$  В.
2. Работает в автоматическом режиме работы стабилизации по защитному потенциалу со следующими значениями тока и напряжения:  $I = 0,4$ А,  $U = 4,7$  В, потенциал в точке дренажа  $U_{m-з} = -2,05$  В.
3. Работает эффективно, средний ток равен 13 А, потенциал в точке дренажа  $U_{m-з} = -1,75$  В.

По результатам работ по вскрытию участков газопровода состояние грунта оценивается как мокрый, уровень грунтовых вод находится на поверхности грунта. По характеру грунтов наблюдается преобладание суглинков. Удельное сопротивление грунта составляет 80 Ом\*м.

Имеющиеся средства ЭХЗ обеспечивают защиту по протяженности и во времени на участках на 100%.

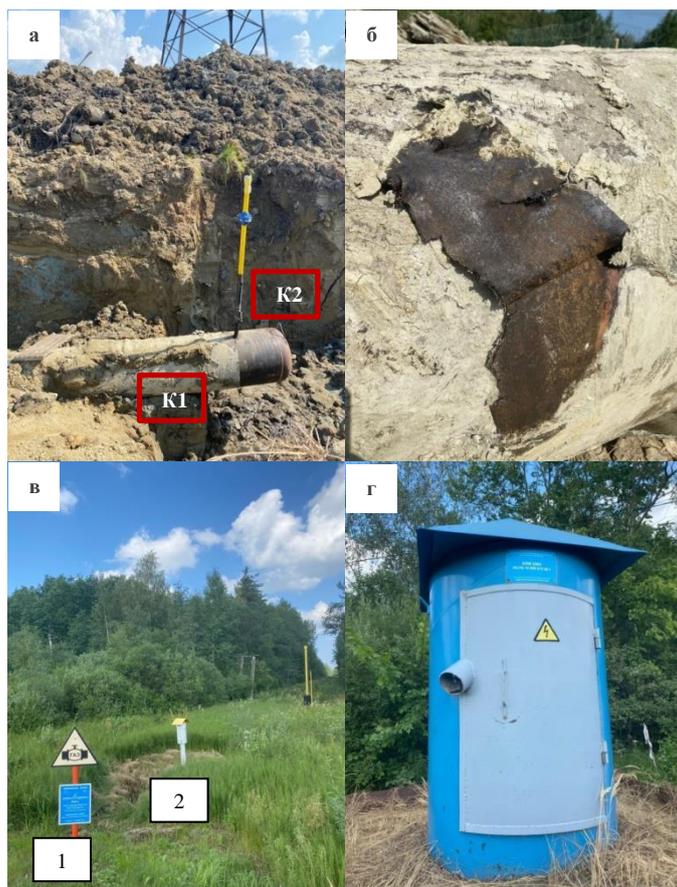


Рис.22 Магистральный газопровод Кипень-Петродворец (участок №1): а – траншея с газопроводом; б – старое изоляционное покрытие ; в – знак, информирующий о проложенном под землей газопроводе(1) и контрольно-измерительный пункт (КИП) (2); г – станция катодной защиты;



Рис.23 Магистральный трубопровод Кипень-Петродворец (участок №2)



Рис. 24 Магистральный газопровод Конная Лахта (участок №3):

а – проходка траншеи для вскрытия трубопровода;

б – знак, информирующий о газопроводе высокого давления под землей и охранной зоне;

в – станция катодной защиты;

## 4.2 Методика и результаты

Изучение влияния постоянных токов системы электрохимической защиты трубопроводов от коррозии на свойства грунтов проводилось в 2020 году С.Н. Хомутильниковым, однако, исследование осуществлялось в рамках моделирования в лабораторных условиях на одном типе грунта – синих кембрийских глинах. В данной выпускной квалификационной работе впервые исследовано влияние токов катодной защиты газопроводов на грунты 3-х разных участков в естественных условиях.

Исследования грунтов включали в себя несколько этапов: 1 этап – подготовительный; 2 этап – полевые исследования; 3 этап – лабораторные исследования.

В подготовительный этап входили сбор необходимых инструментов и материалов для полевых исследований и ознакомление с картами четвертичных отложений изучаемых областей.

Второй этап затрагивал рекогносцировку местности, осмотр газопроводов и изоляций, осмотр станций катодной защиты и контрольно-измерительных пунктов (КИП), фотоотчет; отбор, упаковку и транспортировку грунтов в лабораторию для дальнейших исследований. Всего было отобрано 3 пары грунтов с 2-х участков магистрального газопровода Кипень-Петродворец (участок №1 – грунты К1 и К2, участок №2 – К3 и К4) и с одного участка газопровода Конная Лахта (участок №3 – 2.1 и 2.2). Грунты **К1, К3 и 2.1** отобраны непосредственно у внешней стенки магистральных газопроводов; **К2, К4 и 2.2** – на расстоянии 2-х метров от газопроводов.

В ходе лабораторных исследований изучались следующие физико-химические свойства грунтов: плотность ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>), плотность твердых частиц грунта ( $\rho_s$ , г/см<sup>3</sup>), плотность сухого грунта ( $\rho_d$ , г/см<sup>3</sup>), естественная влажность ( $W_e$ , %), пористость ( $n$ , %), коэффициент пористости ( $e$ ), пределы пластичности ( $W_L$ ,  $W_P$ , %), число пластичности ( $I_P$ ), показатель консистенции ( $I_L$ ) согласно ГОСТу 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». Также был изучен гранулометрический состав грунтов ареометрическим и укороченным ситовым методами (ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава») (рис.25).

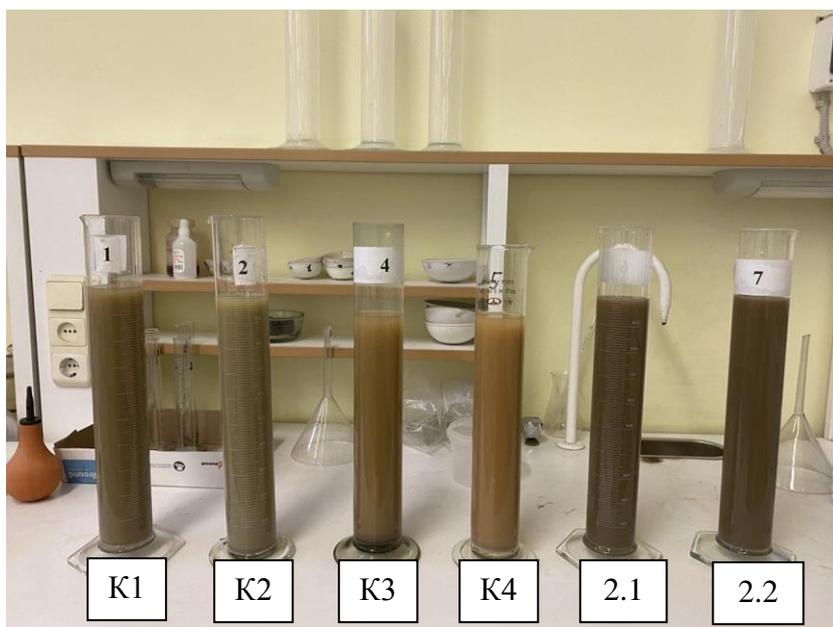


Рис.25 Проведение гранулометрического измерения грунтов

Потенциометрическим методом был изучен водородный показатель (рН) согласно ГОСТу 26423-85 «Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки». Принцип работы измерительного прибора заключается в прохождении тока через электроды, помещенные в исследуемую жидкость (рис.26).

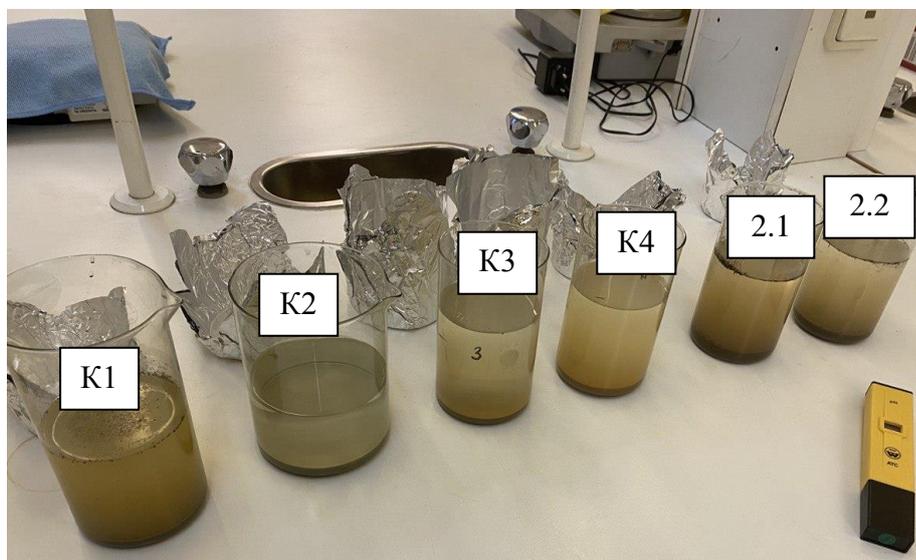


Рис.26 Подготовка водных вытяжек грунта

Интерпретация полученных данных производилась с помощью компьютерных программ. Необходимые для расчета физических свойств грунтов результаты вносились в программу для работы с электронными таблицами (MS Office Excel). Также производился расчет физико-химических характеристик по формулам, представленным в ГОСТе 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения

физических характеристик» и гранулометрического состава в ГОСТе 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава».

Таким образом, были получены результаты гранулометрического состава (табл.4,5,7), и физико-химических свойств грунтов (табл.6). Подробный расчёт гранулометрического состава представлен в Приложении 1; расчёт естественной влажности – в Приложении 2; гигроскопической влажности – в Приложении 3; расчёт показателей пластичности – в Приложении 4; расчёт плотности твёрдых частиц грунта – в Приложении 5; общей плотности и плотности сухого грунта, пористости и коэффициента пористости, коэффициента водонасыщения и рН – в Приложении 6;

**Таблица 4**

Гранулометрический состав

				Фракция, мм							
				песок крупный	песок средний	песок мелкий	песок тонкий	пыль крупная	пыль мелкая	глина	
				1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	<0,002	
№уч.	Место	h, м	Грунт	%							
Южное ЛПУ Кипень-Петроворез	1	Труба	2,80	К1	3,4	7,0	14,3	50,6	2,6	4,7	17,4
		R = 2 м		К2	2,7	4,0	7,5	56,3	1,1	5,4	23,0
	2	Труба	1,85	К3	11,7	12,7	19,8	10,2	26,7	8,4	10,5
		R = 2 м		К4	10,0	9,7	14,4	17,5	25,5	8,5	14,4
Северное ЛПУ Конная Лахта	3	Труба	1,20	2.1	2,2	7,6	7,9	13,4	14,2	37,9	16,8
		R = 2 м		2.2	1,0	4,1	5,9	18,0	7,6	42,6	20,8

**Таблица 5**

Процентное содержание фракций грунтов

№уч.	Грунт	∑ песчаной фракции, %	∑ пылевой фракции, %	Глина, %
1	К1	75	7	17
	К2	71	6	23
2	К3	54	35	10
	К4	52	34	14
3	2.1	31	52	17
	2.2	29	50	21

**Гранулометрический состав** был изучен двумя методами согласно ГОСТу 12536-2014: ареометрическим и ситовым укороченным. В результате анализа наблюдается увеличение содержания песчаной фракции (участок №1 – на 5,6%, участок №2 – на 3,8 %, участок №3 – на 6,9 %) и пылевой фракции (участок №1 – на 16,7%, участок №2 – на 2,9%, участок №3 – на 4,0%), вместе с тем прослеживается уменьшение содержания глинистой фракции в среднем на 25% (участок №1 – на 26,1%, участок №2 – на 28,6 %, участок №3 – на 19,1%). В работе С.Н. Хомутичкина также прослеживается увеличение содержание песчаной (на 9,6%) и пылевой (на 5%) фракций, снижение содержание глинистой фракции (на 14,2%). Графическое изображение изменения гранулометрического состава на участках №1-3 на гистограммах (рис.27,28,29).

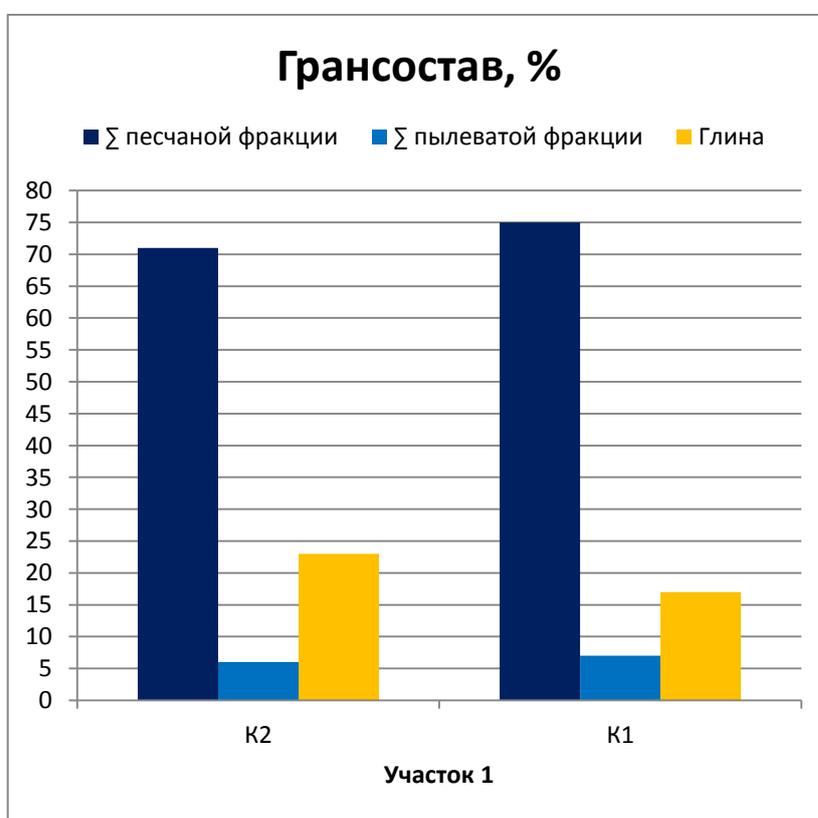


Рис.27 Гистограмма изменения гранулометрического состава на участке №1

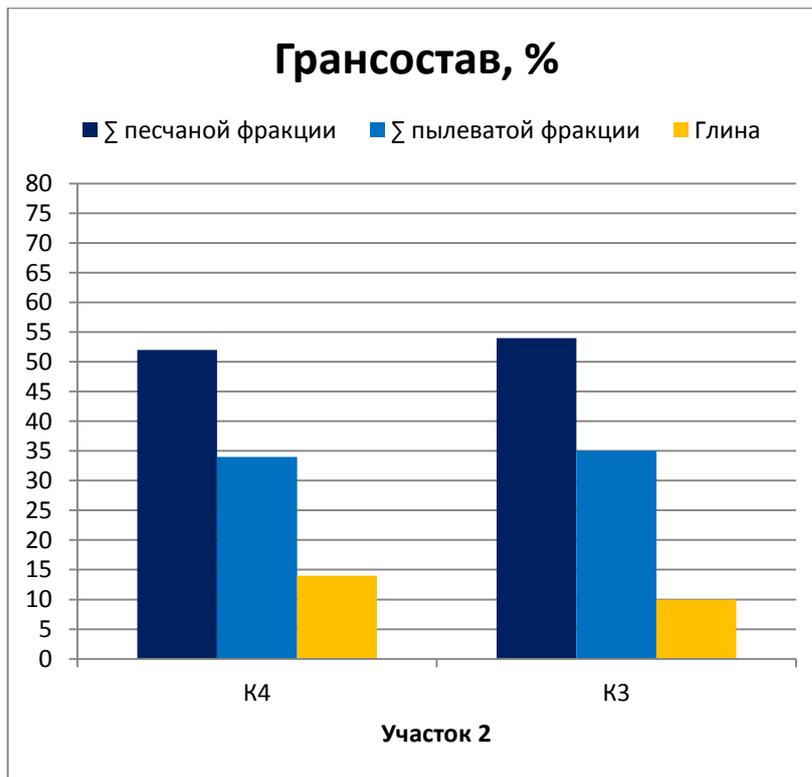


Рис.28 Гистограмма изменения гранулометрического состава на участке №2

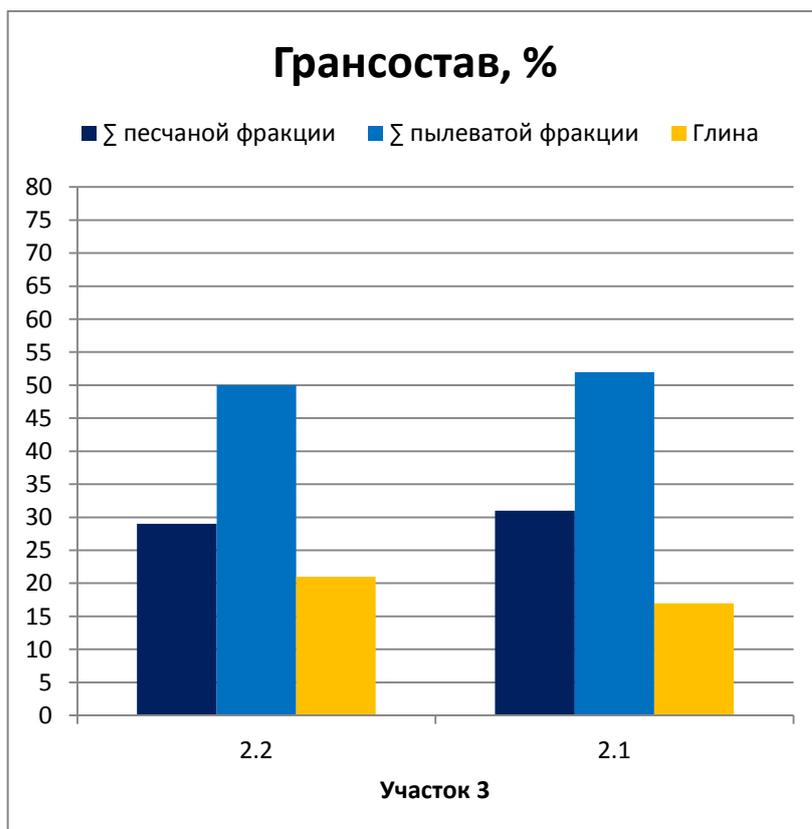


Рис.29 Гистограмма изменения гранулометрического состава на участке №3

Данные изменения связаны с процессом электрокоагуляции, то есть с процессом 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. Большую роль в этом процессе также играет электрофорез частиц, под действием которого усиливается соударение частиц и образование агрегатов (Королёв, 2015). Таким образом, в результате электрокоагуляции глинистые частицы сближаются и слипаются, образуя более крупные образования.

**Таблица 6**

**Физико-химические свойства грунтов**

	№ уч.	Место	h, м	Грунт	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	W <sub>e</sub> , %	Sr	n, %	e	$\frac{W_L}{W_P}$ , %	I <sub>p</sub>	I <sub>L</sub>	pH
Южное ЛПУ Климень-Петродворец	1	Труба	2,80	К1	2,03	1,73	2,73	20	0,95	37	0,58	26,93	6,5	-0,03	7,4
		R = 2 м		К2	2,14	1,78	2,78	18	0,87	36	0,56	20,40			
	2	Труба	1,85	К3	2,06	1,83	2,72	15	0,85	33	0,49	25,65	9,0	-0,16	7,0
		R = 2 м		К4	2,28	1,98	2,76	12	0,83	28	0,40	23,83 15,97			
Северное ЛПУ Конная Лахта	3	Труба	1,20	2.1	1,68	1,18	2,63	46	0,98	55	1,23	40,37	17,5	1,30	6,0
		R = 2 м		2.2	1,81	1,24	2,73	42	0,96	54	1,19	22,85 37,37 23,70			

**Естественная влажность** грунтов также заметно изменилась. Данный показатель определялся в ходе высушивания грунта до постоянной массы согласно ГОСТу 5180-2015. По мере приближения к газопроводу влажность грунтов значительно увеличивается: на участке №1 – на 11,1%, на участке №2 – на 25,0%, на участке №3 – на 9,5%. В работе Хомутичкина С.Н. (2020) данное изменение равно 5%. На рисунке 30 представлено изменение влажности на изучаемых участках.

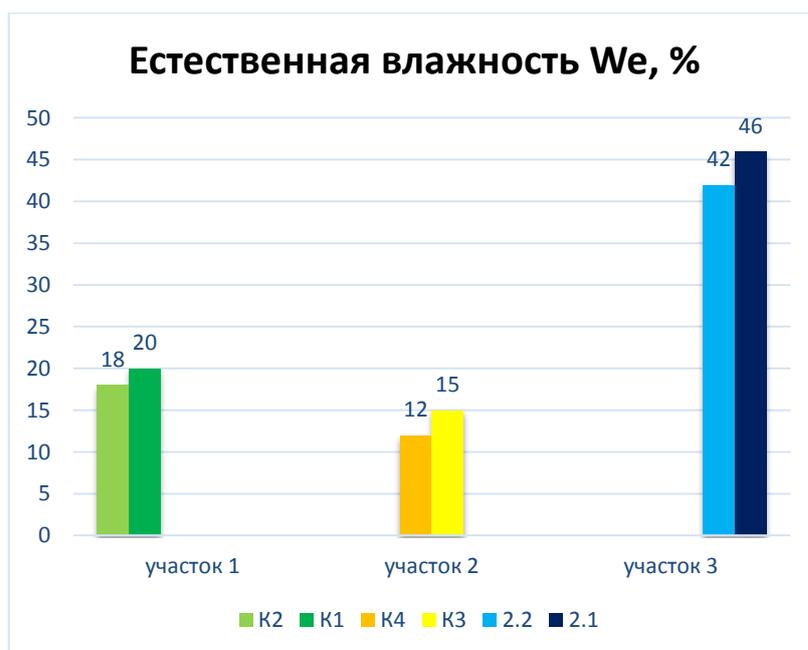


Рис.30 Гистограмма изменения естественной влажности (%) на участках №1, №2 и №3

*Коэффициент водонасыщения*, который отражает степень заполнения пор водой, соответственно, имеет большие значения у газопровода. Рост влажности приводит к увеличению диффузии ионов железа и увеличению коррозионной активности грунта, что напрямую сказывается на протекании коррозии.

Влажность оказывает непосредственное влияние на содержание органических веществ в грунтах. Рост влажности приводит к увеличению содержания биотической компоненты, что в свою очередь можно наблюдать при сравнении суспензий грунтов, вмещающих магистральные газопроводы, и грунтов, залегающих на расстоянии 2-х метров от них. На рисунке 25 хорошо прослеживается различие цветов суспензий грунтов: в случае, когда грунт расположен у изоляции трубопровода – суспензия обладает более темным цветом.

*Плотность* определялась методом режущего кольца согласно ГОСТу 5180-2015. Вследствие влияния токов катодной защиты происходит процесс разуплотнения грунтов. Таким образом, плотность грунтов снижается: на участке №1 – на 5,1 %, на участке №2 – на 9,7 %, на участке №3 – на 7,2 %. Для синих кембрийских глин данное значение составило 9,1%.

Плотность твердых частиц грунта снижается на участке №1 на 1,8%, на участке №2 – на 1,5%, на участке №3 – на 3,7 %; плотность сухого грунта снижается на участке №1 на 2,8%, на участке №2 – на 7,6%, на участке №3 – на 4,8 % (у кембрийских глин – на 12,8%). На гистограммах наглядно показано, как изменилась общая плотность, плотность сухого грунта и плотность твердых частиц (рис.31,32,33).

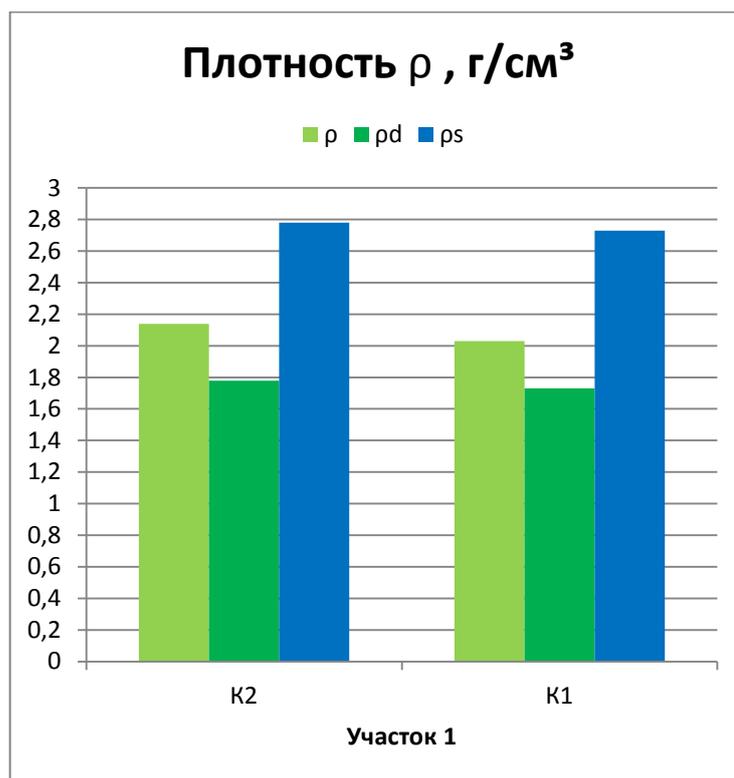


Рис.31 Гистограмма изменения общей плотности, плотности сухого грунта и плотности твердых частиц грунта на участке №1

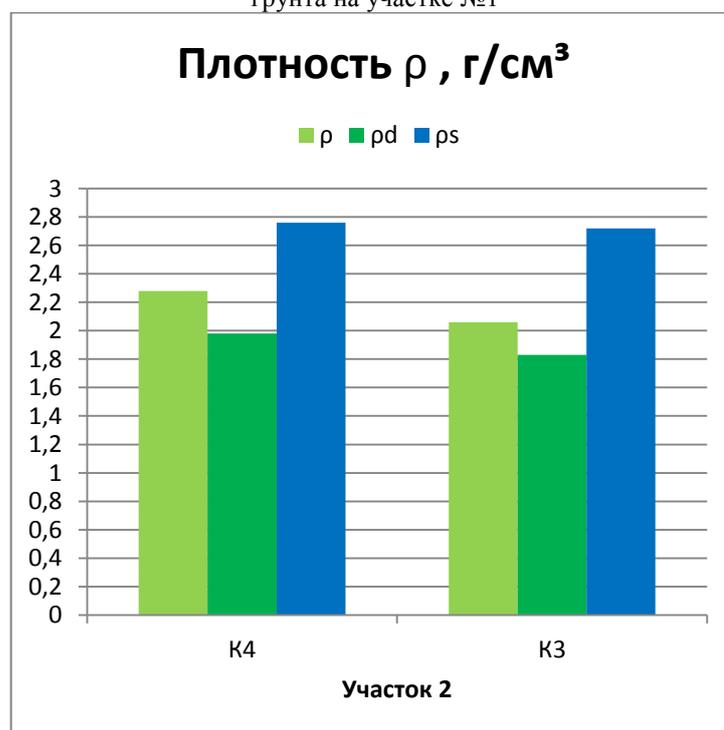


Рис.32 Гистограмма изменения общей плотности, плотности сухого грунта и плотности твердых частиц грунта на участке №2

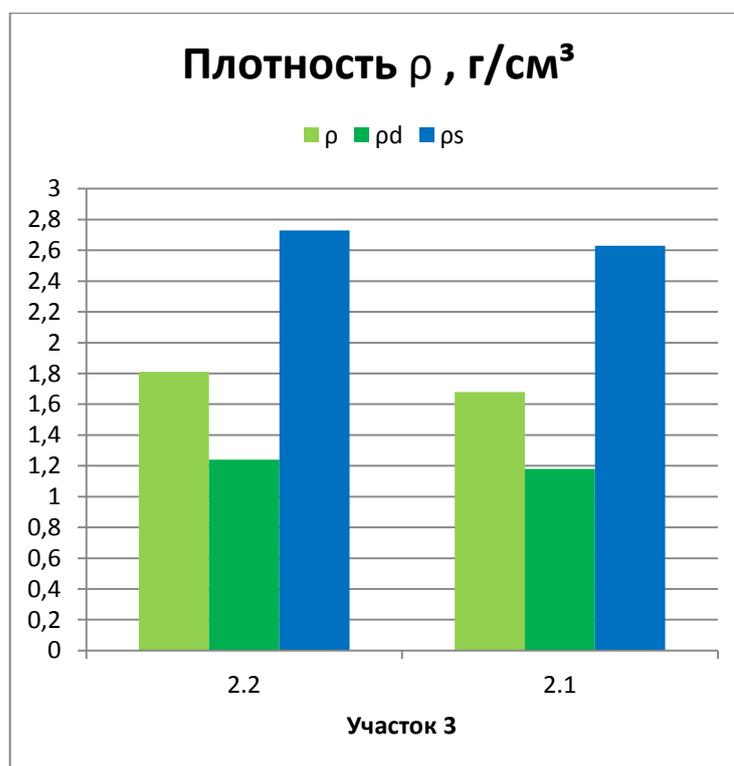


Рис.33 Гистограмма изменения общей плотности, плотности сухого грунта и плотности твердых частиц грунта на участке №3

**Пористость** наоборот растет: на участке №1 – на 2,8%, на участке №2 – на 7,9%, на участке №3 – на 1,9 %. Пористость синих глин в исследовании С.Н. Хомутичкиной увеличилась на 7,1%.

В результате электроосмотического потока микроструктура грунта в катодной зоне становится более рыхлой, крупные поры заполняются водой, наблюдается псевдотурбулентная структура, в анодной же зоне наоборот: микроструктура становится однородной и плотной с тонкими и мелкими порами вследствие электроосмотического осушения (см. главу 1).

Снижение плотности и рост пористости приводит к увеличению доступа кислорода к грунтам – воздухопроницаемости, что в свою очередь повышает скорость протекания коррозионного процесса вследствие катодного процесса деполяризации. Воздух проникает к различным участкам металлической конструкции неравномерно, в результате чего возникают гальванические пары.

**Показатели пластичности** также претерпели некоторые изменения. Влажность на границе раскатывания  $W_L$  (нижний предел пластичности) имеет тенденцию к росту по мере приближения к газопроводу. В случае участков №2 и №3 данный показатель возрастает на 7,6% и 8,0% соответственно. Влажность на границе текучести  $W_P$  (верхний предел пластичности) ведет себя по-разному: на участках №1 и

№3 падает, в то время как на участке №2 возрастает на 4,4%. Скорее всего, данные показатели связаны с человеческим фактором в ходе определения пластичности.

Число пластичности  $I_p$  на участке №1 возрастает на 10,2%, на участке №2 – 13,9%, на участке №3 – 27,7%. В модели С.Н. Хомутичникова (2020) нижний предел пластичности возрастает на 6%, верхний – на 14%, а число пластичности – на 8%. По мере приближения к газопроводу консистенция грунтов смещается к более текучему состоянию. Величину изменения можно наблюдать на графике, приведенном ниже (рис. 34).

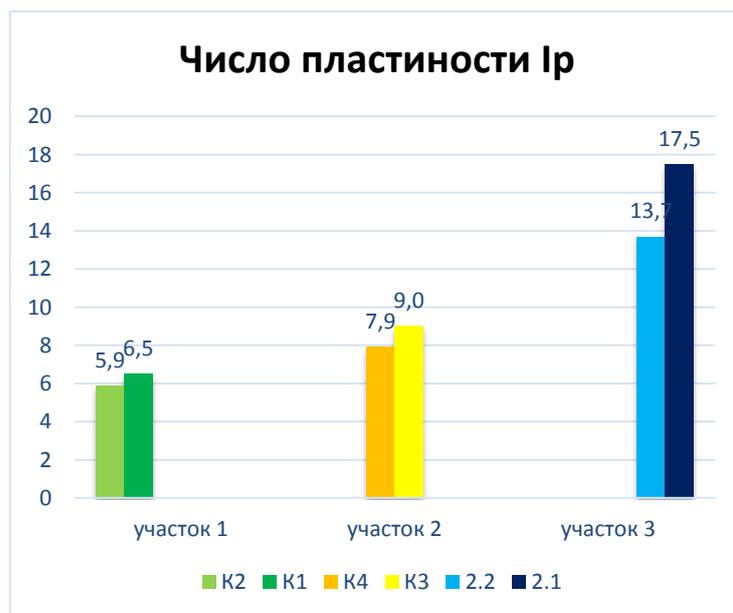


Рис.34 Гистограмма изменения  $I_p$  на участках №1, №2 и №3

Значительные изменения показателей пластичности можно связать с увеличением содержания органики в грунтах. Примесь органических веществ оказывает пластифицирующее действие на глинистые грунты, а увеличение щелочности среды повышает емкость катионного обмена, что, в свою очередь, увеличивает толщину гидратных оболочек грунтовых частиц (Лысенко, 1980; Королев, 2015, Хомутичников, 2020).

Согласно классификации дисперсных грунтов по грансоставу по В.В. Охотину (табл.7) названия грунтов не во всех случаях совпадают с названиями грунтов, классифицированных по числу пластичности (табл.8). Различия прослеживаются у обоих грунтов на участке №1 и у грунта, расположенного у газопровода на участке №3. Стоит отметить, что во всех случаях числа пластичности близки к значениям, которые характеризуют суглинки ( $7 < I_p \leq 17$ ) (табл.6). Однако названия грунтов будут приниматься согласно классификации по числу пластичности.

Таблица 7

Название грунтов по классификации В.В. Охотина		
№уч.	Грунт	Название по классификации дисперсных грунтов по грансоставу по В.В. Охотину
1	К1	Суглинок средний
	К2	Суглинок тяжелый
2	К3	Суглинок легкий
	К4	Суглинок легкий
3	2.1	Суглинок средний пылеватый
	2.2	Суглинок тяжелый пылеватый

Таблица 8

Название грунтов по числу пластичности		
№уч.	Грунт	Классификация по числу пластичности и показателю текучести
1	К1	Супесь твердая
	К2	Супесь твердая
2	К3	Суглинок твердый
	К4	Суглинок твердый
3	2.1	Глина текучая
	2.2	Суглинок текучий

**Водородный показатель рН** над трубопроводом сдвигается в сторону более щелочной среды, что обуславливается восстановлением кислорода с превращением его в ион гидроксила, то есть протекает процесс кислородной деполяризации. В процентном соотношении рН увеличивается на участке №1 на 10,4%, на участке №2 – на 4,5%, на участке №3 – на 13,2%.

Повышение водородного показателя происходит за счет увеличения концентрации гидроксильных групп. Согласно диаграмме Пурбе, которая отражает зависимость потенциала от водородного показателя в системе железо-вода (рис.12), для сохранения иона железа в кристаллической решетке при большем рН необходим больший потенциал. Таким образом, с ростом водородного показателя растет коррозионная активность грунта. На гистограмме (рис.35) наглядно показано увеличение рН.

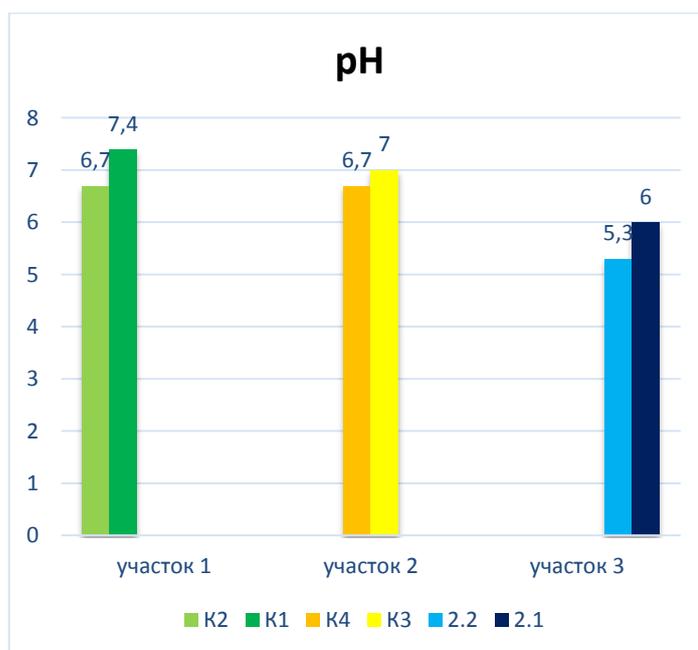


Рис.35 Гистограмма изменения pH на участках №1, №2 и №3

**Прочностные свойства** в данной работе не были рассмотрены, однако согласно исследованию С.Н. Хоммутинникова вследствие воздействия токов системы электрохимической защиты газопроводов от коррозии на синие кембрийские глины угол внутреннего трения и сцепления увеличились. Данные изменения связаны с увеличением содержания песчаной фракции в катодной зоне.

В работе Хоммутинникова С.Н. (2020) на синих кембрийских глинах было доказано, что **удельное электрическое сопротивление** грунтов под действием катодной защиты падает, следовательно, возрастает коррозионная агрессивность.

Из всего вышенаписанного становится очевидно, что вследствие воздействия токов катодной защиты происходит значительное изменение свойств грунтов. В зависимости от величины потенциала трубопровода, можно провести некоторые закономерности. В целях наглядности сводная таблица потенциалов трубопровода  $U_{m-з}$  на 3-х участках представлена ниже (табл.9). Четко видно, что наибольшим потенциалом трубопровод-земля обладает газопровод Кипень-Петродворец на участке №2, наименьшим – на участке №1.

Таблица 9

Потенциалы трубопровод-земля на исследуемых участках (Ут-3)

	№уч.	Ут-3, В
Южное ЛПУ Кипень-Петродворец	1	-1,59
	2	-1,82
Северное ЛПУ Конная Лахта	3	-1,63

Известно, что потенциал газопровода будет расти в результате увеличения токов электрохимической защиты. Таким образом, чем больше потенциал газопровода, тем на больший процент уменьшается глинистость грунта и тем на больший процент увеличивается содержание песчаных и пылеватых частиц по сравнению с участками, обладающими меньшим потенциалом.

С ростом потенциала трубопровод-земля значительно увеличивается и влажность, и, соответственно, процент изменения влажности по сравнению с другими участками. Чем выше потенциал труба-земля, тем больше снижается плотность грунтов и тем больше увеличивается их пористость.

В результате, наибольшие изменения свойств грунтов происходят на участке с наибольшим потенциалом газопровода и с наибольшим изменением глинистости – на участке №2, из этого следует, что электрокинетические явления (электрокоагуляция, электроосмос, электрофорез) на данном участке будут протекать сильнее, чем на участках с меньшим потенциалом.

Безусловно, электрохимическая защита газопроводов является эффективным способом замедления коррозии, однако вследствие длительного влияния токов катодной защиты на грунты происходит значительное изменение их физико-химических свойств, вследствие чего коррозионная обстановка существенно меняется.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение электрохимической защиты магистральных трубопроводов с целью предотвращения процессов коррозии является необходимой мерой, однако она влечет за собой изменение свойств, структуры и состояния грунтов.

В результате исследования наблюдаются закономерные различия физико-химических свойств грунтов, вмещающих магистральные газопроводы Кипень-Петродворец и Конная Лахта, и грунтов, залегающих на расстоянии 2 м от них.

По мере приближения к газопроводам, глинистость грунтов значительно падает (на 19,1-28,6%); содержание песчаной и пылеватой фракций увеличивается (на 3,8-6,9% и на 2,9-16,7% соответственно). Такие существенные изменения связаны с электрокинетическими процессами, в основном с процессом электрокоагуляции.

Грунты расположенные непосредственно над трубопроводом обладают меньшей плотностью (на 5,1-9,7%), плотностью сухого грунта (на 2,8-7,6%) и твердых частиц (на 1,5-3,7%). Помимо этого, наблюдается рост пористости от 1,9 до 7,9%. Данные изменения связаны с электроосмотическим процессом, который приводит к структурному преобразованию грунта и его разуплотнению.

Естественная влажность грунтов у газопроводов выше на 9,5-25,0%. Увеличение данной характеристики приводит к значительному возрастанию коррозионной активности грунта.

Показатели пластичности также претерпевают изменения. Отмечается рост числа пластичности на 10,2-27,7%. По мере приближения к газопроводу консистенция грунтов смещается к более текучему состоянию.

Водородный показатель pH над трубопроводом сдвигается в сторону более щелочной среды, что обуславливается кислородной деполяризацией, то есть восстановлением кислорода с превращением его в ион гидроксила.

В результате воздействия постоянного тока, грунт становится более дезинтегрированным, увеличивается доступ кислорода, а так же обмен кислорода с водой, что в свою очередь значительно увеличивает коррозионную активность грунта.

В конечном итоге увеличение защитного потенциала сооружения влечет за собой ухудшение коррозионной обстановки, и именно поэтому необходимо выбирать оптимальные параметры катодной защиты (учитывать размер токов, не превышать защитные потенциалы) и обеспечивать её эффективность. Таким образом, благодаря токам электрохимической защиты трубопроводов формируются техногенно-измененные грунты, которые необходимо выделять отдельный инженерно-геологический элемент.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антропов Л.И., Е.М. Макушин, В.Ф. Панасенко. Ингибиторы коррозии металлов. – К.: Техника, 1981. – 183 с.
2. Багрова Т.Н. Ландшафтообразующие процессы ленинградской области. – СПб: РГГМУ, 2021. – 76 с.
3. Баранов В.Я., Фролов В.И. Электрокинетические явления. Учебное пособие. – М.: РГУ нефти и газа, 2002. – 53 с.
4. Бискэ Ю.С. Геология России: Курс лекций. – СПб: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2019. – 228 с.
5. Бурлуцкий С.Б., Еремеева А.А. Коррозия и защита от коррозии конструкционных материалов и сооружений. Учебное пособие. – СПб, 2020 – 37 с.
6. Валашковский Р.Ю. Техника борьбы с коррозией / Сухотин А.М. – Л.: Химия. Ленинградское отделение, 1978. – 304 с.
7. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1976. – 512 с.
8. Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского: [Электронный ресурс]. URL: <https://vsegei.ru/ru/> (Дата обращения: 15.03.2022)
9. Геологический атлас Санкт-Петербурга / Под ред. Филиппова Н.Б. – СПб: Комильфо, 2009. – 57 с.
10. Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П. Коллоидная химия. – СПб.: Изд-во Лань, 2010. – 336 с.
11. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация.
12. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
13. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
14. ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки.
15. ГОСТ 9.602-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
16. ГОСТ Р 51164-98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии.
17. МЧС России. Трубопроводный транспорт: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mchs.gov.ru> (Дата обращения: 03.03.2022).

18. ГОСТ 9.602–2016 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии / Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2016. – 87 с.
19. Геология СССР. Том 1. Ленинградская, Псковская и Новгородская области / Под ред. Котлукова В.А. – М: Недра, 1955. – 292 с.
20. Гидрогеология СССР. Том 3. Ленинградская, Псковская и Новгородская области / Под ред. Архангельского Б.Н., Зайцева И.К. – М: Недра, 1967. – 325 с.
21. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии). – Л.: Стройиздат, Лен. отд-ние, 1988. – 415 с..
22. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. №1. С. 1-47.
23. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Metallurgia, 1976. – 472 с.
24. Зайцев О.С. Химия. Учебник для академического бакалавриата. – М.: Изд-во Юрайт, 2015. – 470 с.
25. Информационный техно портал. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tehnoinfo.ru> (Дата обращения: 15.04.2022)
26. Исаченко А.Г. Основы Ландшафтоведения и физико-географическое районирование. – М.: Высшая школа, 1991. – 366 с.
27. Клинов И.Я. Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы. М-Л.: Госхимиздат, 1950. – 294 с.
28. Клындюк А.И. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебное пособие. – Минск: БГТУ, 2011. – 317 с.
29. Коробко А.А. Инженерно-геологический анализ и оценка условий строительства и эксплуатации сооружений различного назначения в пределах предглинтовой низменности (Санкт-Петербургский регион). Диссертация. Санкт-Петербург, 2-15. – 223 с.
30. Королёв В.А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. – М.: ООО «Сам полиграфист», 2015. – 468 с.
31. Красноярский В.В., Ларионов А.К. Подземная коррозия металлов и методы борьбы с ней. – М.: Издательство Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1962 – 308 с.

32. Мальцева, Г.Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии: Учеб. пособие / Г.Н. Мальцева; под ред. д. т. н., проф. С.Н. Виноградова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000.– 55 с.
33. Мангушев Р.А., Карлов В.Д., Сахаров И.И. Механика грунтов: Учебник. – М.: Издательство АСВ, 2015. – 256 с.
34. Мухин В.А. Коррозия и защита металлов. [Учебно-методическое пособие]. – Омск: Омск. гос. унт., 2004 – 112 с.
35. Нефтегаз-2022. 21-я международная выставка «Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса»: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.neftegaz-expo.ru> (Дата обращения: 09.04.2022)
36. Петрова Л.Г., Тимофеева Г.Ю., Демин П.Е., Косачев А.В. Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов. – М.:МАДИ, 2016. – 148 с.
37. Подгорный, А.А. Защита подземных металлических трубопроводов от коррозии. – Киев: Из-во «Будівельник», 1987. – 176 с.
38. Притула В. В. Подземная коррозия трубопроводов и резервуаров. – М.: Акела, 2003. – 225 с.
39. Познайка.Орг. Сайт знаний: [Электронный ресурс]. URL: <https://poznayka.org> (Дата обращения: 22.03.2022)
40. Разумовский В. М. Рекомендации по обеспечению ландшафтно-экологической репрезентативности региональной сети ООПТ Ленинградской области, 2007.
41. Ролдугин В.И. Курс лекций по коллоидной химии. – М: МГУ, 2015. – 27 с.
42. Румянцева В.Е. Процессы коррозионной деструкции и защиты металлов: учебное пособие / В.Е. Румянцева. – Иваново: ИВГПУ, 2016. – 156 с.
43. Савицкая Т. А., Котиков Д. А., Шичкова Т. А. Коллоидная химия: строение двойного электрического слоя, получение и устойчивость дисперсных систем. Пособие для студентов химического факультета. – Минск: БГУ, 2011. – 82 с.
44. Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов: [Электронный ресурс]. URL: <https://thesaurus.rusnano.com> (Дата обращения: 26.04.2022)
45. Справочник химика 21. Химия и химическая технология: [Электронный ресурс]. URL: <https://chem21.info> (Дата обращения: 29.03.2022)
46. Станки-лэнд. Техника и технологии: [Электронный ресурс]. URL: <https://strata.su> (Дата обращения: 09.04.2022)

47. Стрижевский, И.В. Защита металлических сооружений от подземной коррозии: Справочник / И.В. Стрижевский, А.М. Зиневич, К.К. Никольский и др. – М.: Недра, 1981.– 293 с.
48. Федосова Н.Л. Антикоррозионная защита металлов. – Иваново, 2009. – 187 с.
49. Хомутинников С.Н. Оценка влияния постоянных токов системы электрохимической защиты трубопроводов от коррозии на свойства дисперсных грунтов: маг.дис. ест. наук: 05.04.01 / Хомутинников Сергей Николаевич. – Санкт-Петербург, 2020. – 69 с.
50. Чухарева Н.В., Абрамова Р.Н., Болсуновская Л.М. Коррозионные повреждения при транспорте скважинной продукции / Методические указания. – Томск: Изд. Томского Ун-та, 2019. – 65 с.
51. Шубенкова Е.Г. Коллоидная химия. – Омск: ОмГТУ, 2014. – 32 с.
52. Яблучанский А.И. Оптимизация параметров катодной защиты в системе коррозионного мониторинга как необходимое условие повышения надежности газотранспортной системы // Коррозия Территория Нефтегаз. 2016. №1 (33). С. 74-77.
53. Ярославцева О.В, Рудой В.М., Останин Н.И., Останина Т.Н., Трофимов А.А. Теория и технология электрохимических методов защиты от коррозии: [учебно-методическое пособие] / Под ред. Даринцевой А.Б. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2016. – 96 с.
54. Baeckman von W.v., Schwenk W. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. Weinheim: Verlag Chemie. 1980. – 496 p.
55. Grahame D.C. The role of the cation in the electrical double layer. - Journal of The Electrochemical Society, 1951 98. pp. 343-350.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица расчёта гранулометрического состава грунтов

№ уч.	Место	h, м	Грунт	m нав.	Ситовой анализ, грамм			Ситовой анализ, %			Отсчёт по ареометру			Температура			Поправка к темп.			Попр. ареом.	Отсчёт с погр.				К
					1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	1 мин	30 мин	11 ч	1 мин	30 мин	11 ч									
Южное ЛПУ Кипень-Петродворец	1	2,80	К1	30,0 2	1,01	2,10	4,30	3,36	7,00	14,32	3,5	3,0	2,2	20,0	20,0	19,5	0	0	-0,1	1,2	4,7	4,2	3,3	5,26	
				30,0 0	0,81	1,21	2,24	2,70	4,03	7,47	4,3	4,1	3,2	20,0	20,0	19,5	0	0	-0,1		5,5	5,3	4,3	5,36	
	2	1,85	К3	30,0 8	3,53	3,83	5,95	11,74	12,73	19,78	7,5	2,4	0,9	20,0	20,0	19,5	0	0	-0,1		8,7	3,6	2,0	5,24	
				30,0 9	3,02	2,91	4,32	10,04	9,67	14,36	7,9	3,1	1,6	20,0	20,0	19,5	0	0	-0,1		9,1	4,3	2,7	5,32	
Северное ЛПУ Конная Лахта	3	1,20	2.1	30,0 3	0,66	2,29	2,37	2,20	7,63	7,89	11,9	9,2	2,1	20,0	20,0	19,5	0	0	-0,1	13,1	10,4	3,2	5,26		
				30,0 4	0,31	1,24	1,78	1,03	4,13	5,93	12,8	11,3	3,0	20,0	20,0	19,5	0	0	-0,1	14,0	12,5	4,1	5,07		

Продолжение таблицы расчёта гранулометрического состава грунтов

№уч.	Место	h, м	Грунт	Окончательный отсчёт			0,1-0,05	Ареометрический метод, %		
				0,05-0,01	0,01-0,002	<0,002		0,05-0,01	0,01-0,002	<0,002
Южное ЛПУ Кипень-Петродворец	1	2,80	К1	24,72	22,09	17,36	50,59	2,6	4,7	17,36
				29,46	28,39	23,03	56,34	1,1	5,4	23,03
	2	1,85	К3	45,60	18,87	10,48	10,16	26,7	8,4	10,48
				48,39	22,87	14,36	17,54	25,5	8,5	14,36
Северное ЛПУ Конная Лахта	3	1,20	2.1	68,91	54,71	16,83	13,38	14,2	37,9	16,83
				70,94	63,34	20,78	17,97	7,6	42,6	20,78

Таблица расчёта влажности грунтов

	№уч.	Место	h, м	Грунт	№бюкса	тб	тб+вл.гр	тб+сух.гр	W	W
Южное ЛПУ Кипень-Петродворец	1	Труба	2,80	К1	281	2237	3963	3672	20,28	20,19
					156	2177	3706	3450	20,11	
		R = 2 м		К2	106	2113	3916	3645	17,69	17,59
					381	2187	3530	3330	17,50	
	2	Труба	1,85	К3	378	2227	3761	3555	15,51	15,25
					155	2018	3422	3239	14,99	
		R = 2 м		К4	268	2187	4411	4158	12,84	12,31
					243	2255	4096	3902	11,78	
Северное ЛПУ Конная Лахта	3	Труба	1,20	2.1	60	2270	4052	3482	47,03	45,54
					176	2249	4087	3525	44,04	
		R = 2 м		2.2	858	2154	4284	3655	41,91	41,91
					1761	2132	3527	3115	41,91	

Таблица расчёта гигроскопической влажности грунтов

	№уч.	Место	h, м	Грунт	№бюкса	тб	тн	тб+н	тб+сн	W <sub>г</sub>
Южное ЛПУ Кипень-Петродворец	1	Труба	2,80	<b>К1</b>	18	23,7466	5,09	28,8443	28,7883	1,11
		R = 2 м		<b>К2</b>	15	21,2882	5,22	26,5109	26,45	1,09
	2	Труба	1,85	<b>К3</b>	357	21,5757	5,1	26,6751	26,65	0,58
		R = 2 м		<b>К4</b>	9	25,1367	5,4	30,542	30,52	0,45
Северное ЛПУ Конная Лахта	3	Труба	1,20	<b>2.1</b>	5	23,1476	5,16	28,3076	28,25	1,05
		R = 2 м		<b>2.2</b>	12	22,7151	5,25	27,9588	27,92	0,82

Таблица показателей пластичности грунтов

	№уч.	Место	h, м	Грунт	№б	мб	мб+вл.гр	мб+с.гр	WL, Wp	Ip	IL
Южное ЛПУ Кипень-Петроворец	1	Труба	2,80	К1	363	2187	4850	4285	26,93	6,5	-3,12
					352	3047	3950	3797	20,40		
		R = 2 м		К2	76	2052	4159	3687	28,87	5,9	-3,89
					4	2275	3078	2928	22,97		
	2	Труба	1,85	К3	51	2397	4229	3855	25,65	9,0	-1,85
					148	2236	3293	3142	16,67		
R = 2 м		К4		315	2143	4393	3960	23,83	7,9	-2,03	
				181	2088	3148	3002	15,97			
Северное ЛПУ Конная Лахта	3	Труба	1,20	2.1	105	2165	4773	4023	40,37	17,5	-1,30
					16	2213	3143	2970	22,85		
		R = 2 м		2.2	141	3250	5680	5019	37,37	13,7	-1,73
					351	2122	2905	2755	23,70		

Таблица расчёта плотности твердых частиц грунтов

	№уч.	Место	h, м	Грунт	№ бокса	мгр, г (м)	мп, г	мп+в, г (м2)	мсгр,г (м0)	мп+в+гр, г (м1)	ρs, г/см <sup>3</sup>
Южное ЛПУ Кипень-Петродворец	1	Труба	2,80	<b>К1</b>	10	12,19	36,92	136,77	12,06	144,41	2,73
		R = 2 м		<b>К2</b>	1	12,31	32,86	132,71	12,18	140,52	2,78
	2	Труба	1,85	<b>К3</b>	203	12,21	33,22	133,23	12,14	140,90	2,72
		R = 2 м		<b>К4</b>	44	12,17	32,54	132,32	12,12	140,05	2,76
Северное ЛПУ Конная Лахта	3	Труба	1,20	<b>2.1</b>	333	12,33	34,11	134,28	12,20	141,85	2,63
		R = 2 м		<b>2.2</b>	222	12,28	30,60	130,70	12,18	138,41	2,73

Таблица расчёта общей плотности и плотности сухого грунта, пористости и коэффициента пористости, степени водонасыщения и рН

№уч.	Место	h, м	Грунт	№к	mk, г	Vк, см <sup>3</sup>	mk+гр, г	p, г/см <sup>3</sup>	pd, г/см <sup>3</sup>	n, %	e	Sr	pH
Южное ЛПУ Кипень-Петроворез	1	2,80	К1	38	38,00	37,29	113,78	2,03	1,73	37	0,58	0,95	7,4
			К2	38	38,00	37,29	117,81	2,14	1,78	36	0,56	0,87	6,7
	2	1,85	К3	38	38,00	37,29	114,71	2,06	1,83	33	0,49	0,86	7,0
			К4	7	41,76	36,31	124,43	2,28	1,98	28	0,40	0,85	6,7
Северное ЛПУ Конная Лахта	3	1,20	2.1	38	38,00	37,29	100,53	1,68	1,18	55	1,23	0,98	6,0
			2.2	7	41,76	36,31	107,46	1,81	1,24	54	1,19	0,96	5,3