

Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Инновационный Евразийский университет



ЗАЙЦЕВА Н.М., ИСАБЕКОВА Б.Б., КЛЕЦЕЛЬ М.Я.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

**монография  
пособие для магистрантов и докторантов**

Павлодар 2014

УДК 624.131.437.311  
ББК 31.264.7  
З-17

*Рекомендовано к изданию  
Ученым советом Инновационного Евразийского университета  
Протокол №7 от 29.01.2014 года  
и Ученым советом Энергетического института Национального  
Исследовательского Томского Политехнического Университета  
Протокол №45 от 22.04.2014 г.*

**Рецензенты:**

**Асамбаев А.Ж.** – кандидат технических наук, доцент ПГПИ;  
**Иванова Е.В.** – доктор технических наук, профессор ИнЕУ;  
**Новожилов А.П.** – доктор технических наук, профессор ПГУ  
им. С. Торайгырова.

**Зайцева Н.М.**

**З-17** Определение удельного электрического сопротивления грунта на основе использования нечеткой логики: Монография / Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова, М.Я. Клецель. – Павлодар: Инновац. Евраз. ун-т, 2014. – 148 с.

ISBN 978-601-7380-38-0

В монографии излагаются результаты научных исследований по определению удельного электрического сопротивления грунта на основе использования нечеткой логики. Предназначена для магистрантов и докторантов, изучающих электроэнергетику и может быть полезна студентам электроэнергетических специальностей.

УДК 624.131.437.311  
ББК 31.264.7

ISBN 978-601-7380-38-0 © Инновационный Евразийский университет, 2014  
© Зайцева Н.М., Исабекова Б.Б., Клецель М.Я., 2014

**Клецель Марк Яковлевич** в 1961 г. закончил электро-механический факультет Карагандинского политехнического института, в 1998 г. защитил докторскую диссертацию по теме “Развитие теории и реализация релейной защиты подстанции с электродвигателями” в Казахском научно-исследовательском институте энергетики, профессор-консультант кафедры “Электроэнергетические системы” Национального Исследовательского Томского Политехнического Университета, профессор кафедры «Автоматизация и Управление» Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова

**Зайцева Наталья Михайловна** в 1974 г. закончила факультет автоматизированных систем Новосибирского электро-технического института, в 1998 г. защитила кандидатскую диссертацию по теме “Исследование и разработка математических моделей оперативного управления замкнутым гидрохимическим производством” в Новосибирском Государственном Техническом Университете, доцент кафедры “Математики и информационных технологий” Инновационного Евразийского Университета, докторант кафедры «Электроэнергетические системы» Национального Исследовательского Томского Политехнического Университета

**Исабекова Бибигуль Бейсембаевна** в 2005 г. закончила факультет физики, математики и информационных технологий Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова, в 2011 г. защитила кандидатскую диссертацию по теме «Определение температуры и влажности грунта для расчета сопротивлений заземлителей» в Омском Государственном Техническом Университете, старший преподаватель кафедры “Информатика” Павлодарского Государственного Педагогического Института.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
Обозначения и сокращения	8
1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ	9
1.1 Рабочее заземление и заземляющие устройства	9
1.2 Требования к заземлениям и расчет их сопротивлений	22
1.3 Методы определения удельного электрического сопротивления грунта	32
1.4 Вопросы для проверки знаний	36
2 ОСНОВЫ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ	37
2.1 Нечеткие множества	38
2.2 Операции над нечеткими множествами	40
2.3 Нечеткая и лингвистическая переменные	44
2.4 Функции принадлежности	46
2.5 База нечетких правил	50
2.6 Нечеткие выводы	51
2.7 Примеры нечеткой логики	56
2.8 Вопросы для проверки знаний	67
3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ $\rho$ ГРУНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ	68
3.1 Программы для расчета параметров заземлителей	68
3.2 Построение зависимостей определения удельного электрического сопротивления грунта $\rho$ от влажности	69
3.3 Построение модели $\rho$ в зависимости от температуры в области отрицательных ее значений	77
3.4 Вопросы для проверки знаний	83
4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ	84
4.1 Существующие методы определения влажности грунта	84
4.2 Зависимость влажности грунта от климатических условий	86
4.3 Определение влажности грунта на глубинах ниже 1 м	92

4.4	Вопросы для проверки знаний	96
5	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТА	97
5.1	Существующие методы определения температуры грунта	97
5.2	Определение температуры грунта на основе ее среднемесячных значений	99
5.3	Определение теплофизических характеристик грунта для расчета его температуры	104
5.4	Вопросы для проверки знаний	113
6	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ГРУНТА	114
6.1	Существующие методы определения плотности грунта	114
6.2	Экспериментальные исследования плотности	115
6.3	Вопросы для проверки знаний	122
7	ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА, РЕАЛИЗУЮЩАЯ ПРЕДЛОЖЕННЫЕ МЕТОДЫ	123
7.1	Окончательные формулы расчета удельного электрического сопротивления грунта	124
7.2	Реализация алгоритма определения удельного электрического сопротивления грунта	125
7.3	Программа для определения сопротивлений заземлителей в однородном и двухслойном грунтах	129
7.4	Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения разработанной программы	131
7.5	Вопросы для проверки знаний	134
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
	Список использованной литературы	138
	Приложение А	144
	Приложение Б	144
	Приложение В	145

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Работа электроэнергетических систем немыслима без заземляющих устройств (ЗУ). Расчет их параметров представляет собой сложную задачу. Большой вклад в создание новых и совершенствование существующих методов расчета сопротивлений ЗУ внесли Авербух М.А., Бургсдорф В.В., Долин П.А., Зубов К.Н., Карякин Р.Н., Немировский А.Е., Нестеров С.В., Саркисова Л.А., Солнцев В.И., и др.

Важнейшей характеристикой ЗУ является их электрическое сопротивление, которое пропорционально удельному электрическому сопротивлению  $\rho$  грунта, а  $\rho$  меняется в широких пределах в зависимости от температуры  $t$ , влажности  $v$ , плотности  $d$  и вида грунта. Известные формулы и сезонные коэффициенты, рекомендуемые правилами устройства электроустановок для расчета  $\rho$ , дают лишь приблизительную картину его изменения от выше перечисленных параметров, что влечет за собой усложнение конструкции устройства заземления и увеличение количества металла для его изготовления.

Анализ широко известных программ для определения параметров заземлителей показывает, что в них вводится значение  $\rho$ , измеренное традиционными методами, и корректируется с помощью поправочных коэффициентов, учитывающих климатическую зону и влажность, или выбирается диапазон его значений. При этом пренебрегается зависимостью  $\rho$  грунта от  $t$ ,  $v$  и  $d$ . Это приводит к весьма приблизительным результатам.

В данной работе предпринята попытка освятить существующие методы определения сопротивлений заземлителей, где основным параметром является удельное сопротивление грунта, исходная информация о котором представляется лишь предполагаемым диапазоном значений. Традиционно подобные задачи решаются или вероятностными методами, или методами теории нечетких множеств. Но вероятностные модели дают результаты, которые далеко не всегда можно применить на практике. Применение же теории нечетких множеств позволяет на основе неопределенной информации получить конкретный результат, что важно для

практического применения. Поэтому была поставлена задача определения  $\rho$  грунта в зависимости от его температуры и влажности на основе использования нечеткой логики, решение которой и предлагается в данной работе.

В первой главе рассмотрены общие методы определения сопротивлений заземлителей, требования к ЗУ, эксплуатация и их установка, а также существующие методы определения удельного сопротивления грунта. Вторая глава раскрывает основы теории нечеткой логики и нечетких множеств. Изложены принципы создания моделей расчета параметров. Приведены примеры. В третьей главе представлена методика определения удельного электрического сопротивления грунта с использованием нечеткой логики. Описана экспериментальная установка для определения  $\rho$  грунта. Приведены примеры расчета. Но и она имеет недостатки: требует большого количества трудоемких измерений  $t$  и  $v$  грунта, а также не учитывает влияние плотности грунта, что решается в следующих трех разделах данной монографии. В седьмом разделе изложены алгоритм и описание программы для расчета удельного электрического сопротивления грунта с учетом предложенных методов.

Авторы стремились так изложить материал книги, чтобы читатели могли самостоятельно использовать аппарат нечетких множеств для решения интересующих их задач.

Книга предназначена для магистрантов, аспирантов и докторантов электроэнергетических специальностей, а так же для научных работников и инженеров.

## **Обозначения и сокращения**

ЗУ – заземляющие устройства,  
ПУЭ – правила устройств электроустановок,  
ВЛ – воздушные линии,  
ЛЭП – линии электропередач,  
ТИ – точечный источник,  
ОУ - объект управления,  
НЛ – нечеткая логика,  
НП – нечеткая переменная,  
ЛП – лингвистическая переменная,  
ФП – функция принадлежности.



# 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

## 1.1 Рабочее заземление и заземляющие устройства

Защитное заземление - преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением вследствие замыкания на корпус или по другим причинам (индуктивное влияние соседних токоведущих частей, вынос потенциала, разряд молнии и т. п.) [1].

**Назначение защитного заземления** - устранение опасности поражения током в случае прикосновения к корпусу электроустановки и другим нетоковедущим металлическим частям, оказавшимся под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам [2].

Защитное заземление следует отличать от рабочего заземления и заземления молниезащиты.

Рабочее заземление – преднамеренное соединение с землей отдельных точек электрической цепи, например нейтральных точек обмоток генераторов, силовых и измерительных трансформаторов, дугогасящих аппаратов, реакторов поперечной компенсации в дальних линиях электропередачи, а также фазы при использовании земли в качестве фазного или обратного провода [2]. Рабочее заземление предназначено для обеспечения надлежащей работы электроустановки в нормальных или аварийных условиях и осуществляется непосредственно (т.е. путем соединения проводником заземляемых частей с заземлителем) либо через специальные аппараты - пробивные предохранители, разрядники, резисторы и т. п.

Заземление молниезащиты - преднамеренное соединение с землей молниеприемников и разрядников в целях отвода от них токов молнии в землю [3].

**Принцип действия защитного заземления** - снижение до безопасных значений напряжений прикосновения и шага, обусловленных замыканием на корпус и другими причинами. Это достигается путем уменьшения потенциала заземленного оборудования (уменьшением сопротивления заземлителя), а также путем выравнивания потенциалов основания, на котором

стоит человек, и заземленного оборудования (подъемом потенциала основания, на котором стоит человек, до значения, близкого к значению потенциала заземленного оборудования) [3,4].

Заземляющие устройства (ЗУ) являются неотъемлемой частью электроэнергетических систем, влияющие на надежность их работы и на безопасность обслуживающего персонала [2-5]. Заземляющим устройством (ЗУ) называется совокупность заземлителя – проводников (электродов), соединенных между собой и находящихся в непосредственном соприкосновении с землей, и заземляющих проводников, соединяющих заземляемые части электроустановки с заземлителем [3]. Назначение ЗУ заключается в снижении потенциалов и градиентов напряжения до приемлемых значений.

Заземлить электрическую сеть - это значит соединить с землей нейтрали генераторов или соответствующих обмоток силовых трансформаторов - непосредственно или через элементы, обладающие сопротивлением (индуктивным или активным) - с целью придать сети определенные свойства [3]. Выражение «соединить с землей» означает присоединить нейтраль к заземляющему устройству, основу которого составляет заземлитель, состоящий из ряда изолированных проводников, находящихся в контакте с землей и предназначенных для проведения тока в землю. Сопротивление заземлителя должно быть относительно невелико и практически не влиять на этот ток.

Вид рабочего заземления определяется номинальным напряжением  $U_{ном}$  сети. При  $U_{ном}$  от 6 до 35 кВ электрические устройства не заземляют или заземляют через настроенные индуктивные сопротивления, при  $U_{ном}$  от 110 кВ и выше их заземляют эффективно [3], т.е. нейтрали трансформаторов присоединяют к заземляющему устройству непосредственно или через реакторы с небольшим индукционным сопротивлением.

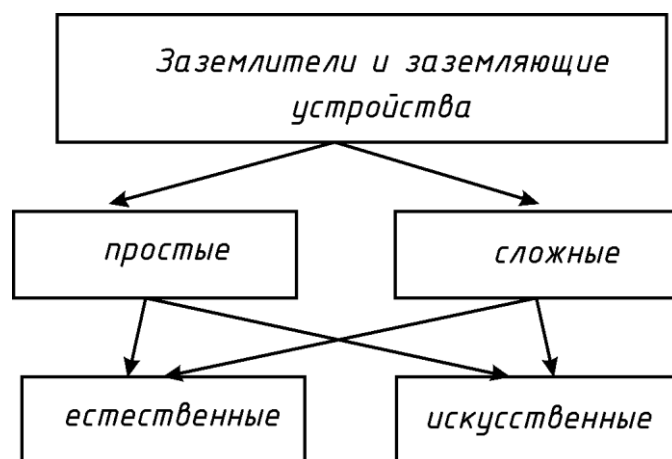


Рисунок 1.1 – Виды заземлителей

Условно заземлители делят на две группы (см. рис.1.1). К первой группе относят простые заземлители, состоящие всего из одного электрода, выполненного, например, в виде вертикального или горизонтального электрода, полусферы, тора и т.д. Вторая группа включает сложные заземлители, состоящие из комбинаций горизонтальных и вертикальных электродов. Если все электроды (элементы) сложного заземлителя расположены горизонтально и образуют в плане замкнутый контур, то его называют заземляющей сеткой, а при наличии и вертикальных электродов – комбинированным заземлителем [6, 7].

ЗУ подразделяются на естественные (вспомогательные) и искусственные (основные) [8]. Для заземляющих устройств любого назначения используются в первую очередь естественные заземлители. Они связываются с магистралями заземлений двумя проводниками, присоединенными к заземлителю в разных местах, кроме металлических оболочек кабелей, опор высоковольтных линий (ВЛ) и повторных заземлений нулевого защитного проводника [8-10]. Естественными заземлителями могут быть [8]:

1) подземные или подводные части стальных, железобетонных конструкций и сооружений, все металлические трубопроводы, кроме трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ, смесей, канализации и центрального отопления, обсадные трубы и рельсы, технологические, кабельные и совмещенные (стальные и железобетонные) эстакады промышленных предприятий, свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле, при числе кабельных линий не менее двух;

2) железобетонные фундаменты производственных зданий и сооружений;

3) заземлители опор ВЛ, соединенные с заземляющим устройством электроустановки при помощи грозозащитного троса ВЛ (если трос не изолирован от опор ВЛ), и нулевые провода ВЛ напряжением 1кВ с повторными заземлителями при числе ВЛ не менее двух (их применяют для снижения напряженности на корпусе относительно земли в момент прохождения тока короткого замыкания и особенно при обрыве нулевого защитного проводника. Повторное заземление выполняют путем заземления нулевого защитного проводника на вводе здания и на концах питающей ЛЭП).

Если естественных заземлителей нет или они неэффективны, то используют искусственные заземлители, длина и глубина залегания которых зависит от климатических условий [11-12]. Часто в электроустановках используются и те, и другие заземлители, включенные параллельно [8]. Для изготовления искусственных заземлителей применяется сталь. При организации заземлений конструкции заземлителей засыпаются однородным мягким грунтом [13-14], т.е. не содержащим щебня и строительного мусора, с трамбовкой на глубину 200 мм, а затем местным на оставшуюся глубину. Горизонтальный заземлитель из полосовой стали укладывается на дно траншеи на ребро (рис. 1.2, б) [9], глубина прокладки которого не менее 0,5-0,7 м. Горизонтальные заземлители используются и для связи вертикальных. Длина вертикального заземлителя, представленного на рис. 1.2, а, определяется проектом, но не должна быть менее 1 м; верхний его конец заглубляется (не менее чем на 0,5– 0,7 м).

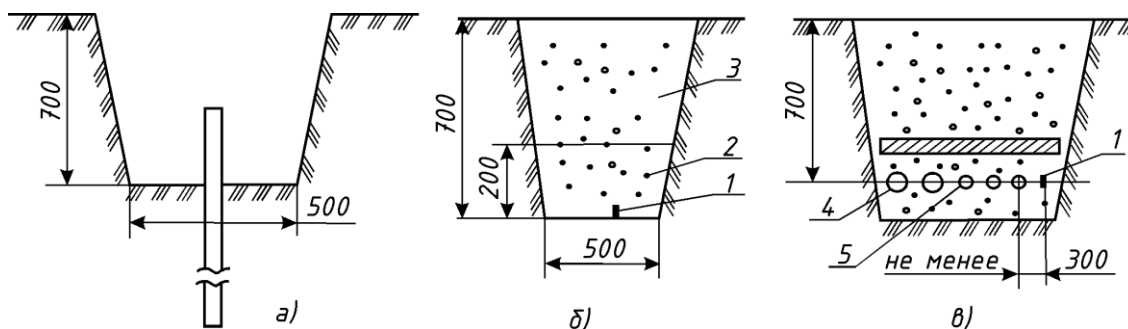


Рисунок 1.2 – Установка вертикального заземлителя (а), прокладка горизонтальных ЗУ в траншее (б) и совместно с кабелем (в): 1- полоса;

2 - мягкий грунт (в основном песок без камней и примесей);  
 3 - грунт; 4, 5 – силовые и контрольные кабели.

Заземлитель, прокладываемый параллельно кабелям или трубопроводам, должен быть расположен от них на расстоянии не менее 0,3 м, а при пересечениях – не менее 0,1 м (рис. 1.2, в). Рекомендуется гидроизолировать заземлитель в местах входа в грунт и в местах пересечения ими грунтов с различной воздухопроницаемостью. Для гидроизоляции используются противокоррозийные ленты, полихлорвиниловые обмотки и тафтяные ленты (тафтяная лента это плотная хлопчатобумажная или шелковая ткань с мелкими поперечными рубчиками или узорами на матовом фоне) с пропиткой их горячим битумом. При высокой коррозионной активности грунтов для заземлителей рекомендуется использовать оцинкованную сталь круглого профиля и повышенного сечения [10].

В зависимости от места размещения заземлителя относительно заземляемого оборудования различают два типа заземляющих устройств: выносное и контурное. Соответственно и заземлители бывают двух типов: выносные и контурные [2].

Выносное заземляющее устройство характеризуется тем, что заземлитель его вынесен за пределы площадки, на которой размещено заземляемое оборудование, или сосредоточен на некоторой части этой площадки. Поэтому выносное заземляющее устройство называют также сосредоточенным [2].

Контурное заземляющее устройство характеризуется тем, что электроды его заземлителя размещаются по контуру

(периметру) площадки, а также внутри площадки, на которой находится заземляемое оборудование. Часто электроды распределяются на площадке по возможности равномерно, и поэтому контурное заземляющее устройство называется также распределенным.

### Электрическое поле заземлителя

Электрический ток  $I_3$ , распространяющийся с поверхности проводников заземлителя в землю, наводит потенциалы в окружающей проводящей среде, в частности на самом заземлителе. Последний приобретает потенциал [3]:

$$\varphi_3 = I_3 R_3, \quad (1.1)$$

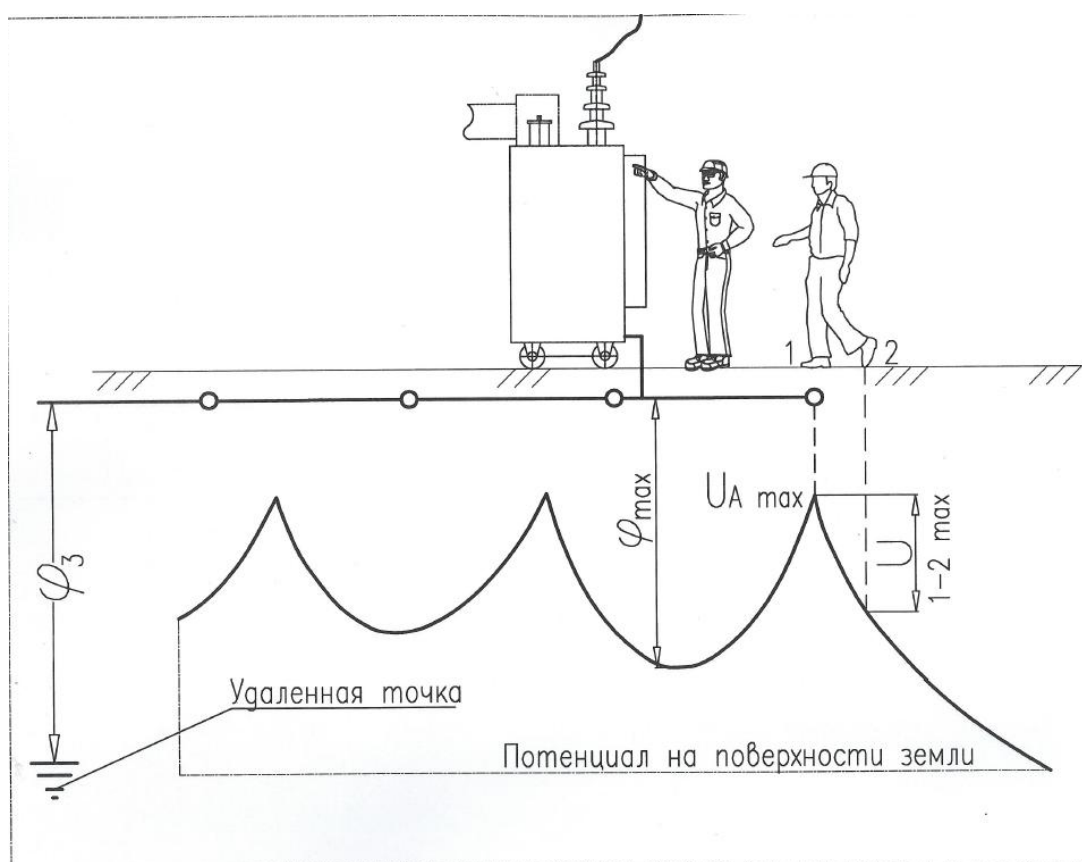


Рис. 1.3 – Схема, поясняющая понятия потенциала заземлителя, максимального напряжения в ячейках сетки и максимального напряжения между двумя точками на поверхности земли, расположенными на расстоянии 1 м друг от друга.

где  $R_3$  - сопротивление заземлителя. По существу это - сопротивление земли от поверхности проводников до некоторой удаленной эквипотенциальной поверхности, потенциал которой близок к нулю. (Эквипотенциальная

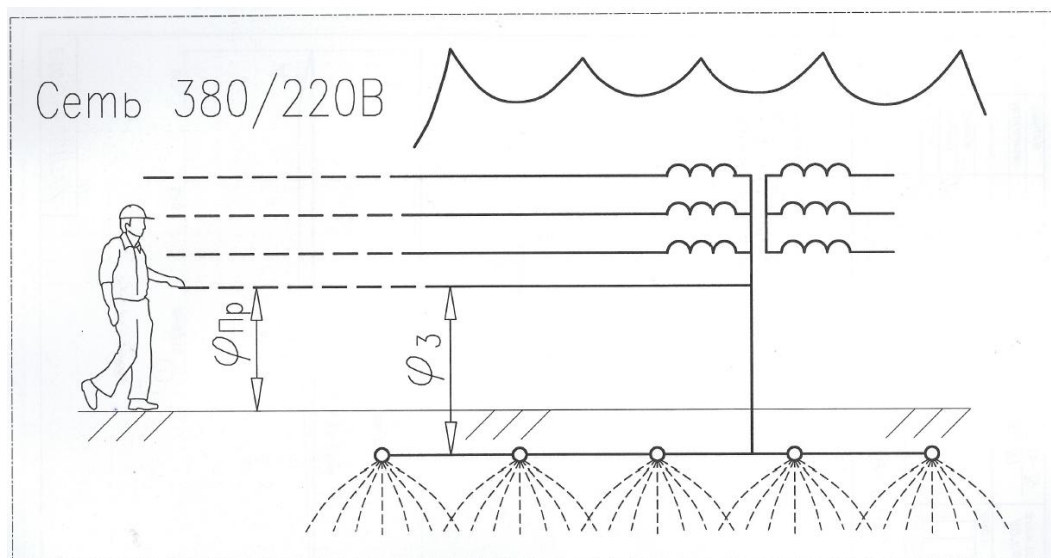
поверхность — это поверхность, на которой скалярный потенциал данного потенциального поля принимает постоянное значение. Поверхность проводника в электростатике является эквипотенциальной поверхностью).

Электрическое поле заземлителя в однородной земле и распределение потенциала  $\varphi_z$  на поверхности земли неравномерное [1]. Наибольший потенциал имеет место над проводниками сетки. Он несколько меньше потенциала заземлителя. Наименьший потенциал  $\varphi_{\min}$  имеет место в середине угловых ячеек сетки. Разность потенциалов  $\varphi_z - \varphi_{\min} = U_{\text{яmax}}$  называют наибольшим напряжением в ячейках сетки. Человек, находящийся в центре угловой ячейки и прикасающийся к заземленному предмету (рис. 1.3), при распространении тока в землю оказывается под некоторым напряжением, получившим название напряжения прикосновения  $U_{\text{п}}$ . Последнее меньше напряжения  $U_{\text{яmax}}$ , так как последовательно с человеком включено сопротивление слоя земли под его ступнями.

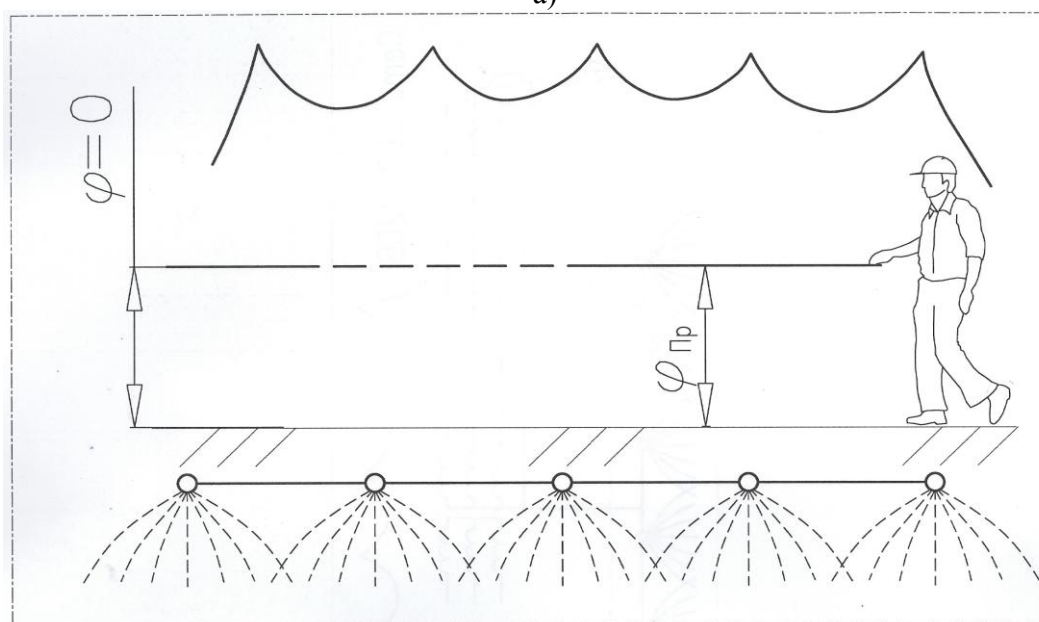
Максимальный градиент напряжения имеет место за пределами сетки, около контурного проводника. Обозначим максимальное напряжение между двумя точками на поверхности земли, расположенными в этой зоне на расстоянии 1 м друг от друга, через  $U_{1-2\text{max}}$  (рис.1.3). Человек, шагающий здесь, при распространении тока в землю оказывается под некоторым напряжением, получившим название напряжения шага  $U_{\text{ш}}$ . Последнее меньше напряжения  $U_{1-2\text{max}}$  так как последовательно с человеком включено сопротивление слоя земли под его ступнями.

Напряжения  $U_{1-2\text{max}}$  и  $U_{\text{яmax}}$  называют частичными напряжениями, поскольку они составляют часть потенциала заземлителя, достигающего в эффективно-заземленных сетях тысяч вольт. Максимальное его значение не должно превышать 10000В. Частичные напряжения значительно меньше - они составляют сотни вольт. Напряжение прикосновения и напряжения шага, приложенные к человеку, еще меньше, так как они ограничены последовательно включенными сопротивлениями поверхностного слоя земли под ступнями человека. Во всяком случае, они должны быть меньше

допустимых значений, установленных нормами, приведенных ниже.



а)



б)

Рисунок 1.4 – Схемы, поясняющие понятия перенесенных потенциалов: а) - потенциал заземлителя вынесен за пределы установки, б) - нулевой потенциал внесен в пределы установки.

Перенесенные потенциалы. Под перенесенным потенциалом, близким к потенциалу заземлителя, может оказаться человек, находящийся вне установки и прикасающийся к проводнику, присоединенному к заземлителю при распространении с него тока (рис. 1.4, а). Человек, находящийся в пределах установки и прикасающийся



к проводнику, заземленному в удаленной точке, при распространении тока с заземлителя (рис. 1.4, б) также оказывается под перенесенным потенциалом, близким к потенциалу заземлителя, а не части его, как при прикосновении к заземленным предметам. Проводниками - переносчиками потенциала – являются нейтральные провода сетей 380/220 В, провода линий связи, рельсы железнодорожных путей и др.

Опасность поражения людей перенесенными потенциалами должна быть исключена еще при проектировании. Сети 380/220 В не должны выноситься за пределы установки. Для электроснабжения местных потребителей предусматриваются особые трансформаторы и особые заземлители вне пределов установки. Чтобы обеспечить безопасность прикосновения к аппаратам связи, предусматривают разделительные трансформаторы и нейтрализующие катушки, изоляция которых должна соответствовать потенциалу заземлителя.

**Действие электрического тока на человека. Допустимые напряжения. Условия безопасности [3].**

Действие электрического тока на человека зависит от его значения, продолжительности и пути, по которому он проходит, а также от физического состояния человека. Наибольшую опасность представляет ток, проходящий через область сердца.

Наименьший ток, воспринимаемый человеком, составляет около 1 мА. Этот ток называют порогом чувствительности. Ток от 1 до 6 мА вызывает боль и непроизвольное сокращение мышц, однако человек не теряет способности отпустить предмет, через который ток входит в руку. При дальнейшем увеличении тока человек теряет эту способность: он не может освободиться от предмета, который он держит. Наибольший ток, при котором подавляющее большинство людей способно освободиться от предмета, который они держат, называется порогом отпускания (равное 9 мА). При увеличении тока дыхание сначала затрудняется и затем становится невозможным, что может привести к смерти от удушья, если вовремя не оказать помощь.

Ток порядка 100 мА при продолжительности, не превышающей нескольких секунд вызывает вентрикулярную фибрилляцию сердца, то есть нарушение нормального ритма

сердца. Единственный способ восстановить нормальную работу сердца заключается в своевременном и умелом контроле затухающим током постоянного направления с помощью особого аппарата - дефибриллятора.

Порог фибрилляции, то есть наибольший ток, который не вызывает фибрилляции сердца у значительного большинства людей, является функцией продолжительности воздействия и может быть определен [20] из следующего выражения:

$$I_{\phi}^2 t = K, \quad (1.2)$$

где  $I_{\phi}$  – порог фибрилляции, А - действующее значение тока с постоянной амплитудой и частотой 50 Гц;  $t$  - продолжительность прохождения тока, сек;  $K$  – некоторая постоянная,  $A^2 \cdot c$ .

Для людей массой около 50кг:  $I_{\phi} = 0,116 / \sqrt{t}$ ; для людей массой около 70кг  $I_{\phi} = 0,157 / \sqrt{t}$ . Эти выражения следует рассматривать как приближенные, справедливые при продолжительности тока от 0,03 до 3 с.

Допустимые напряжения [3]. При проектировании ЗУ пользуются понятиями допустимых напряжений прикосновения и шага, под которыми понимают предельные значения этих напряжений. Допустимые напряжения определены умножением соответствующих пороговых значений тока на сопротивление человека.

Опасность шагового напряжения значительно меньше опасности напряжения прикосновения, так как ток не проходит через область сердца, как при прикосновении к заземленным предметам. Кроме того, в первом случае ток через человека ограничивается большим сопротивлением земли под ступнями, чем во втором.

Условие безопасности прикосновения человека к заземленным предметам в зоне ЗУ в эффективно-заземленной сети:

$$U_{II} = U_{яmax} - I_{\phi} 1,5 \rho_c = I_3 U_3 \alpha_{II} \beta_{II} \leq U_{доп} \quad (1.3)$$

$$\alpha_{II} = U_{яmax} / \varphi_3, \alpha_{III} = U_{1-2max} / \varphi_3 \text{ и } \beta_{II} = \frac{R_{\phi}}{R_{\phi} + 1,5 \rho_c}, \beta_{III} = \frac{R_{\phi}}{R_{\phi} + 6 \rho_c}$$

где  $\rho_c$  - удельное сопротивление верхнего слоя земли,  $\alpha_{II}$  и  $\alpha_{III}$  - коэффициенты напряжения прикосновения и напряжения

шага, значения которых находятся приблизительно в пределах от 0,1 до 0,8 в зависимости от конструкции заземлителя;  $\beta_{II}$  и  $\beta_{III}$  - коэффициенты снижения напряжения прикосновения и напряжения шага, зависящие от удельного сопротивления верхнего слоя земли.

То же для человека, шагающего в зоне распространения тока:

$$U_{III} = U_{1-2max} - I_{ч} b \rho_c = I_3 U_3 \alpha_{III} \beta_{III} \leq U_{доп} \quad (1.4)$$

где  $I_{ч}$  - ток через человека;  $U_{доп}$  - допустимое напряжение, определяемое ГОСТ.

Вероятность травмирования человека электрическим током [3,14]. При нормировании и проектировании ЗУ учитывают вероятность травмирования человека электрическим током. Ниже приведены условия, при совпадении которых возможно травмирование:

1) замыкание в таком месте электрической системы и при таких условиях, при которых ток, распространяющийся в землю, достигает расчетного значения;

2) неблагоприятное состояние земли, например большая влажность верхнего слоя, удельное сопротивление которого определяет значение коэффициента  $\beta_{II}$ ;

3) присутствие человека в таком месте и в таком положении, что он оказывается под опасным напряжением;

4) отсутствие дополнительных сопротивлений (обуви, рукавиц), включенных последовательно с человеком и ограничивающих ток;

5) продолжительность воздействия тока, достаточная для травмирования при рассматриваемых условиях.

### **Нормирование заземляющих устройств [3,14].**

Нормы на заземляющие устройства устанавливают требования [20], которым они должны удовлетворять. Основными являются требования, определяющие условия электробезопасности.

*Первая норма* а) В эффективно-заземленных сетях электробезопасность считается обеспеченной, если  $\varphi_3 < 10000$  В, а результирующее  $R_3 < 0,5$  Ом в любое время года.

б) В сетях незаземленных и заземленных через дугогасящие реакторы электробезопасность считается обеспеченной при следующих условиях: для ЗУ, используемых только для электроустановок 6-35кВ,  $\varphi_3 < 250\text{В}$ , а  $R_3 = 250/I_3$ , но не более 10 Ом; для ЗУ, используемых одновременно и для заземления сетей вторичного напряжения 380/220 В,  $\varphi_3 < 125\text{ В}$ , а  $R_3 = 125/I_3$ , но не более 4 Ом.

*Вторая норма* а) В эффективно-заземленных сетях электробезопасность считается обеспеченной, если  $\varphi_3 < 10000\text{ В}$ , а напряжения прикосновения и шага в любое время года не превышают допустимых значений.

б) в сетях незаземленных и заземленных через дугогасящие реакторы электробезопасность считается обеспеченной при следующих условиях: - для ЗУ, используемых только для электроустановок 6-35 кВ,  $\varphi_3 < 250\text{ В}$ ; - для ЗУ, используемых одновременно и для сетей вторичного напряжения 380/220 В,  $\varphi_3 < 125\text{ В}$ . Сопротивление заземлителей не нормируется и  $U_{III} < 36\text{ В}$ .

Выполнение одной из указанных норм освобождает от выполнения второй нормы. Выбор первой или второй нормы при проектировании и выполнении ЗУ оставлен на усмотрение проектирующей организации. В настоящее время общепризнано [3], что выполнение ЗУ в соответствии со второй нормой обеспечивает большую безопасность и большую экономичность.

### **Эксплуатация заземляющих устройств [14, 23]**

#### **Возможные повреждения заземляющих устройств**

В процессе эксплуатации не исключена возможность повышения сопротивления растеканию тока заземлителя сверх расчетного и нарушения целостности заземляющей проводки. Повышение сопротивления заземлителя может быть вызвано увеличением сопротивления грунта, ухудшением состояния контактов между отдельными элементами заземлителя при прохождении больших токов или в результате коррозии и т.п., нарушением целостности сети заземления (обрывы проводников, ослабление болтовых соединений, нарушение контактов и т.п.), что может быть результатом случайных механических воздействий на заземляющие проводники, а также термического или динамического действия аварийных токов, ошибочных операций при ремонтных работах и прочих действиях.

Во всех случаях заземляющие устройства теряют, как правило, способность обеспечивать безопасность людей во время замыкания фазы на корпус, поскольку при этом возможно значительное увеличение потенциала заземлителя, а следовательно, и напряжений прикосновения и шага. Чтобы исключить указанные опасности, необходимы тщательный надзор за состоянием элементов защитного заземления и периодическое измерение сопротивления заземляющего устройства.

### **Виды и периодичность проверок состояния ЗУ**

Для определения состояния заземляющих устройств действующие правила предписывают производить [14]:

а) измерение сопротивления заземляющего устройства после монтажа, через год после включения в эксплуатацию и в последующем при комплексном ремонте электроустановки, но не реже чем через 10 лет на электростанциях, подстанциях и линиях электропередачи энергосистем, через 3 года на подстанциях потребителей и через 1 год в цеховых электроустановках потребителей.

б) выборочное вскрытие грунта для осмотра элементов заземляющего устройства – при ухудшении параметров заземлителя;

в) проверку наличия цепи между заземленными объектами и заземлителями (отсутствие обрывов, неудовлетворительных контактов и т.п.) – при каждом ремонте или перестановке оборудования, а в электроустановках потребителей, кроме того, при ремонте заземлителей;

г) проверку надежности соединений естественных заземлителей – после каждого их ремонта;

д) проверку состояния пробивных предохранителей – при предположении об их срабатывании, а также – при ремонте и перестановке оборудования.

е) измерение напряжения прикосновения и тока, протекающего через тело человека – при прикосновении к заземленному оборудованию в период замыкания фазы на корпус.

Каждое отдельное заземляющее устройство должно иметь паспорт, содержащий схему устройства, основные технические и расчетные данные, сведения о произведенных ремонтах и внесенных изменениях.

## **1.2 Требования к заземлениям и расчет их**

## **сопротивлений**

Общие требования к ЗУ электроустановок [9]:

1) Работоспособность ЗУ электроустановок в первую очередь обеспечиваются точным определением их параметров. Однако эта задача до конца так и не решена, хотя ей посвящено много работ [8, 15-22].

2) Применяемые в электроустановках ЗУ по своим характеристикам должны соответствовать условиям работы данной электроустановки [9].

3) ЗУ должны быть защищены от воздействия окружающей среды, либо быть стойкими к ним и удовлетворять требованиям действующих нормативных документов об охране окружающей природной среды по допустимым уровням напряженностей электрического и магнитного полей, по электромагнитной совместимости [9].

4) Проектирование заземления производится на основе технико-экономического расчета с учетом требований электробезопасности и электромагнитной совместимости [9].

5) В случае возникновения коррозии должны предусматриваться защитные мероприятия по отношению к ЗУ [9].

6) При проектировании и монтаже ЗУ электроустановок должны подвергаться прямо-сдаточным испытаниям и вводятся в эксплуатацию после их приемки [9].

## **Сопротивление одиночных заземлителей [23].**

Сопротивление растеканию тока одиночного заземлителя определяется по формуле [8]:  $R = \frac{\rho}{\pi \Gamma} C$ , где  $\Gamma$  - главный

(наибольший) линейный размер заземлителя, м;  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м,  $C$  - безразмерный коэффициент, зависящий от формы заземлителя и условий его заглубления. Главный линейный размер для сферы или полусферы  $\Gamma = d$ , где  $d$  - ее диаметр. Для протяженного электрода  $\Gamma = l$ , где  $l$  - его длина. Значения коэффициента  $C$  для наиболее характерных условий заглубления одиночных электродов представлены в [8, 22], например, для

вертикального заземлителя:  $C = \frac{1}{2} \left( \ln \frac{4l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h+l}{4h-l} \right)$ , при условии

$l \gg d, h > \frac{l}{2}$ , где  $h$  - глубина заложения электрода.

Заметим, что по правилам устройств электроустановок (ПУЭ), а также в ряде других нормативных документах, содержащих материал по заземляющим устройствам, сопротивление растеканию тока с заземлителя в землю принято называть сопротивлением растеканию заземлителя или просто сопротивлением заземлителя [1].

Устройство заземлителей в плохо проводящих грунтах встречает серьезные трудности по условиям обеспечения определенного сопротивления растеканию  $R$ . Поэтому ПУЭ допускают для таких установок повышенное значение сопротивления заземляющих устройств  $R$  вплоть до десятикратного установленного сопротивления. Тем не менее, часто приходится прибегать к специальным мерам для снижения  $R$ , в частности применять глубинные заземлители, производить укладку вокруг электродов грунта с повышенной проводимостью или специальную обработку почвы, делать заземления выносными и т.п.

### **Расчет сопротивления контурного заземлителя [23].**

Сопротивление заземляющего устройства, выполненного в виде контурного заземлителя, состоящего из горизонтальной сетки и вертикальных электродов, рассчитывается [8, 23] по

формуле:  $R = \frac{R_{11}R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2R_{12}}$ , где  $R_{11}$  - сопротивление

горизонтальной сетки, Ом;  $R_{22}$  - сопротивление вертикальных электродов, Ом;  $R_{12}$  - взаимное сопротивление между горизонтальной сеткой и вертикальными электродами, Ом.

Сопротивления  $R_{11}, R_{12}, R_{22}$  определяются выражениями [9]:

$$R_{11} = \frac{\rho}{\pi L} \left( \ln \frac{2L}{\sqrt{b_c h}} + 1.37 \frac{L}{\sqrt{S_C}} - 5.6 \right); R_{22} = \frac{\rho}{2\pi n_1 L} \left( \ln \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2.75l}{\sqrt{S_C}} (\sqrt{n_1} - 1)^2 \right);$$

$$R_{12} = \frac{\rho}{\pi L} \left( \ln \frac{2L}{l} + 1.37 \frac{L}{\sqrt{S_C}} - 4.6 \right), \quad \text{где } L \text{ - полная длина}$$

проводников, образующих горизонтальную сетку, м;  $S_C$  - площадь, покрытая сеткой, м;  $l$  и  $d$  - длина и диаметр вертикального электрода, м;  $n_1$  - их число;  $b_c$  - ширина полосы горизонтального проводника, образующего сетку, м;  $h$  -

глубина заложения горизонтальной сетки.

Таким образом, виды заземлителей и их расчет весьма разнообразны и зависят от множества параметров, таких как удельное сопротивление грунта, размеры ЗУ, их конструкции, глубина заложения и т.д.

Для точного расчета сопротивления необходимо учитывать такие факторы, как количество слоев земли, в которых располагаются заземлители, и их взаимное расположение, которое сводится к различным комбинациям параллельных, пересекающихся и скрещивающихся под прямым углом горизонтальных и вертикальных электродов (элементов).

**Расчет сопротивления заземлителей в двухслойном грунте [15].** Алгоритм расчета электрических характеристик сложных ЗУ в земле с многослойной структурой основан на методе наведенного потенциала [15].

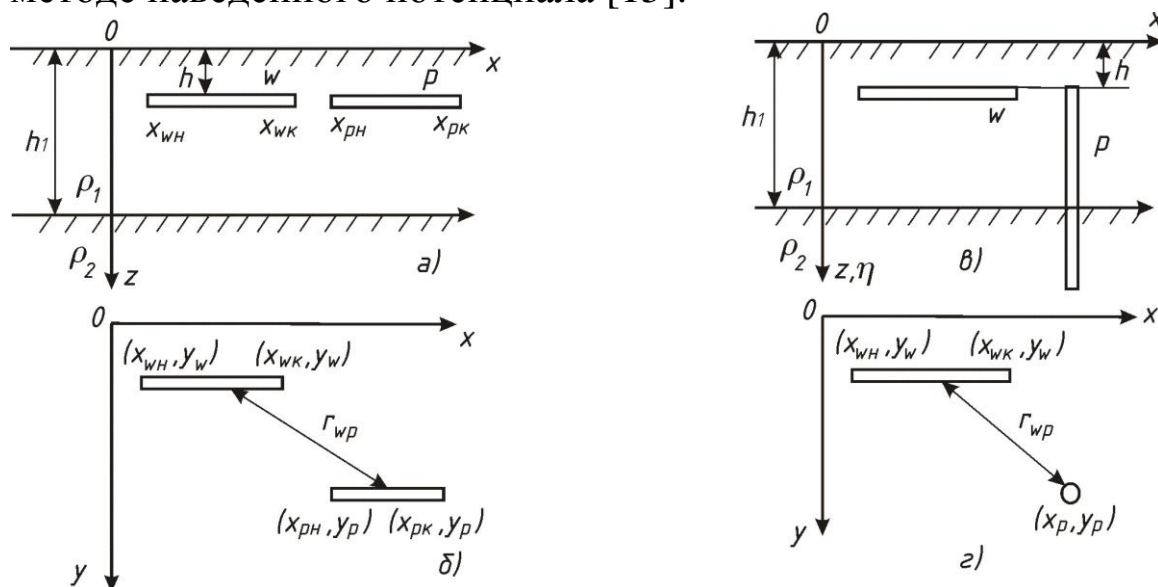


Рисунок 1.5 - К определению  $\alpha_{wp}$ :

а, б – для горизонтальных элементов;

в, г – для горизонтального и вертикального элементов.

Если электроды расположены горизонтально (рис. 1.5, а и 1.5, б), то функции неоднородности линейной плотности тока обоих горизонтальных электродов с номерами  $w$  и  $p$  приравнивают единице, считая, что электроды лежат на одной и той же глубине  $h$  от поверхности земли. Взаимное сопротивление  $\alpha_{wp}$  рассчитывается по формуле [15]:



$$\alpha_{wp} = \frac{1}{l_w l_p} \int_{x_{wn}}^{x_{wk}} dx_m \int_{x_{pn}}^{x_{pk}} \Psi_{(wp)}(r_{wp}, z_p = h, \eta_w = h) dx_p, \quad (1.5)$$

где  $\Psi_{(wp)}$  - функция пропорциональности между током, выходящим из окрестности точки, лежащей на оси электрода  $p$  с координатой  $x_p$  и потенциалом, наводимым этим током в точке на оси электрода  $w$  с координатой  $x_w$ . Расстояние  $r_{wp} = \sqrt{(x_w - x_p)^2 + (y_w - y_p)^2}$  от электрода  $p$  до электрода  $w$ .

Если один из электродов параллелен оси  $y$ , то  $\alpha_{wp}$  вычисляется так [15]:

$$\alpha_{wp} = \frac{1}{l_w l_p} \int_{x_{wn}}^{x_{wk}} dx_w \int_{x_{pn}}^{x_{pk}} \Psi_{(wp)}(r_{wp}, z_p = h, \eta_w = h) dy_p \quad (1.6)$$

Если один из электродов расположен горизонтально, а другой вертикально (рисунок 1.3, в и 1.3, г), то функцию неоднородности линейной плотности тока горизонтального электрода с номером  $p$  приравнивают единице. Верхний конец вертикального электрода с номером  $w$  расположен на той же глубине  $h$  от поверхности земли, что и горизонтальный электрод, то  $\alpha_{wp}$  определяется [15]:

$$\alpha_{wp} = \frac{1}{l_w l_p} \int_{x_{wn}}^{x_{wk}} \left[ f'_{0p_1}(\eta) \int_h^{h_1} \Psi_{1,1}(r_{wp}, h, \eta) d\eta + f'_{0p_2}(\eta) \int_h^{h+l_p} \Psi_{1,2}(r_{wp}, h, \eta) d\eta \right] dx, \quad (1.7)$$

где  $\Psi_{1,1} = \varphi_{1,1}/I$ ,  $\Psi_{1,2} = \varphi_{1,2}/I$ ,  $\varphi_{1,1}, \varphi_{1,2}$  - потенциалы от точечного источника (ТИ) тока в первом и втором слоях,  $f'_{0p}$  - функция удельной проводимости.

Если электроды длиной  $l_g$  расположены вертикально на одной и той же глубине  $h$  от поверхности земли, то для них  $\alpha_{wp}$  [15]:

$$\alpha_{wp} = \frac{1}{l_g^2} \int_h^{h+l_B} f'_{0B}(\eta) d\eta \int_h^{h+l_B} f'_{0B}(z) \Psi_{(wp)}(r_{wp}, z, \eta) dz. \quad (1.8)$$

### **Расчет сопротивления заземлителей в многослойном грунте с применением оптической аналогии.**

В настоящее время этот метод [15] считается одним из наиболее точных и применяется в различных программах, (например, программа «ОРУ-М», НПФ ЭЛНАП, Москва [24].

Для этого расчета, основанного на методе наведенных потенциалов [25], сначала необходимо найти функцию  $\Psi$  пропорциональности между током, выходящим из точечного источника (ТИ) тока, и потенциалом  $\varphi_N$  в произвольной точке  $N$  проводящего полупространства. Эта функция определяется в виде значений в конечном числе точек и хранится в табличной форме.

При их расчете приняты следующие допущения: 1) модель электрической структуры земли – многослойное проводящее полупространство с однородным  $\rho$ ; 2) горизонтальные элементы прямые и расположены на одной и той же глубине  $h_t$  от поверхности земли; 3) верхние концы вертикальных элементов с одинаковой длиной находятся на глубине  $h_t$  от поверхности земли, что и горизонтальные элементы; 4) значения  $\rho_i$  и мощности  $h_i$  всех слоев задаются, при этом мощность последнего  $n$ -ого слоя бесконечно велика.

Оптическая аналогия [15] - это метод, основанный на замене ТИ тока величины  $I$  и проводящего многослойного полупространства соответственно точечным источником (ТИ) света с интенсивностью  $Q$  и абсолютно прозрачным полупространством с системой прозрачных зеркал, т.е.  $I=Q$ . Здесь рассматривается траектория двух лучей и относительное изменение их интенсивностей, по которым строится последовательность ТИ тока (фиктивных). Потенциал  $\varphi_{NN}$  в точке  $NN$  находится в соответствии с принципом наложения [15]:

$$\begin{aligned} \varphi_{NN} &= I \cdot \Psi_{1,2}(r, z \leq h_t, \eta = h_t) = \\ &= \frac{\rho_1}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{q_{i-1,n}}{\sqrt{r^2 + (2nh_t + h_t - z)^2}} + \frac{q'_{i-1,n}}{\sqrt{r^2 + (2nh_t + h_t + z)^2}} \right]. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Исходными данными являются: число слоев  $n$ , удельные сопротивления  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  и толщины слоев  $h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$ ; глубина  $h_t$  от поверхности земли ТИ тока; координаты точек  $NN - r_{NN1}, z_{NN1}; r_{NN2}, z_{NN2}; \dots; r_{NNm}, z_{NNm}$ , относительно которых требуется определить функцию  $\Psi$  взаимного сопротивления между ТИ тока и точкой  $NN$  [15].

Пусть дано  $n$ -слойное проводящее полупространство, показанное на рисунке 1.6, а, у которого толщины всех слоев, за исключением  $n$ -ого, обладают общей наибольшей мерой  $\omega$  (наибольшим общим делителем), такой, что  $h_1 = p_1 \omega$ ;  $h_2 = p_2 \omega$ ; ...;  $h_i = p_i \omega$ ; ...;  $h_{n-1} = p_{n-1} \omega$ . ТИ тока  $I$  располагается на любой из границ между слоями, включая границу полупространства. Если ТИ тока  $I$  находится не на границе между слоями, то вводят дополнительную (фиктивную) границу, проходящую через ТИ тока, т.е.  $n$  заменяется на  $(n+1)$ . На рисунке 1.6, б показана нумерация  $j$  зеркал и слоев, зеркало под номером  $i$  разделяет  $i$ -й и  $(i+1)$ -й слой.

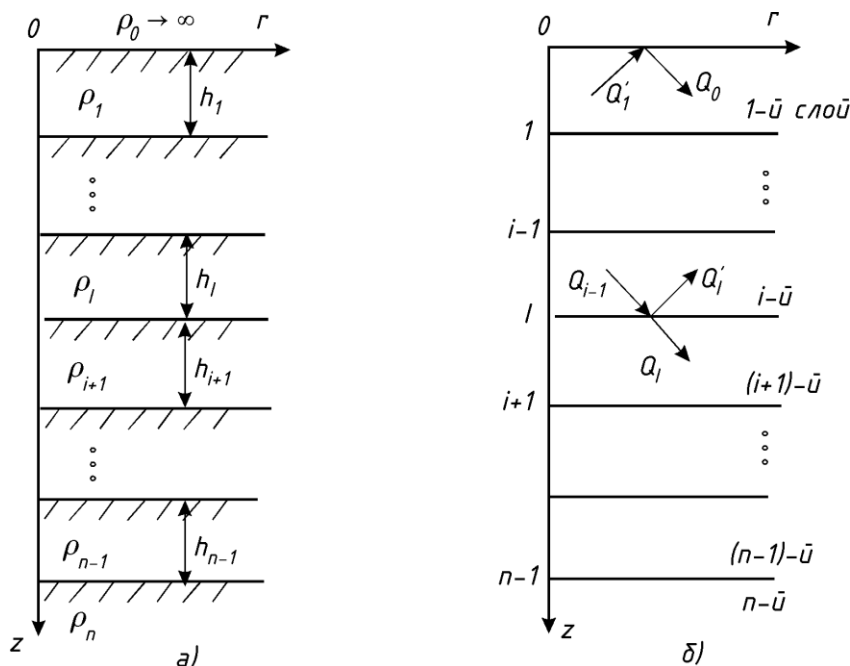


Рисунок 1.6 - Электрическая  $n$ -слойная структура земли (а) и аналогичное абсолютно прозрачное оптическое полупространство с частично прозрачными зеркалами (б): – частично прозрачные зеркала.

Оптические свойства зеркал определяют показатели:  $a$  - коэффициент отражения и  $b$ -коэффициент пропускания, которые вычисляются по следующей формуле, если луч направлен из  $i$ -го слоя в  $(i+1)$ -й [15]:

$$a_{i,i+1} = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_i + \rho_{i+1}}; \quad b_{i,i+1} = 1 - a_{i,i+1} = \frac{2\rho_i}{\rho_i + \rho_{i+1}}. \quad \text{Интенсивность}$$

отраженного луча  $Q_i'$ , направленного из  $i$ -й границы вверх, вычисляется по  $Q_i' = Q_{i-1} a_{i,i+1}$ , а  $Q_i$  - интенсивность луча,

прошедшего через зеркало от  $i$ -й границы вниз, равна  $Q_i = Q_{i-1}b_{i,i+1}$  [15]. Если луч падает из  $(i+1)$ -го слоя на границу с  $i$ -м слоем, то  $a_{i+1,i} = \frac{\rho_i - \rho_{i+1}}{\rho_i + \rho_{i+1}} = a_{i,i+1}$ ;  $b_{i+1,i} = 1 - a_{i+1,i} = 1 + a_{i,i+1}$ ; а  $Q'_i = Q'_{i+1}b_{i+1,i}$ ;  $Q_i = Q'_{i-1}a_{i+1,i}$  [15]. Если луч падает на границу оптического полупространства, то с учетом стремления  $\rho_0$  к бесконечности коэффициенты равны [15]:

$$a_{1,0} = \lim_{\rho_0 \rightarrow \infty} \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_1 - \rho_0} = 1; \quad b_{1,0} = 1 - a_{1,0} = 0.$$

Для построения последовательности ТИ в общем случае, когда исходный источник света не расположен на границе полупространства, рассматривают два луча, направленных от исходного источника вверх и вниз под одинаковыми углами (рисунок 1.6). Лучи, идущие от этого источника, отраженные от зеркала и прошедшие через него, есть блики, которые находятся по формулам [15]:

$$\begin{aligned} q_{ik} &= q_{i-1,k-p_i} b_{i,i+1} + q'_{i+1,k-p_{i+1}} a_{i+1,i}; \\ q'_{ik} &= q_{i-1,k-p_i} a_{i,i+1} + q'_{i+1,k-p_{i+1}} b_{i+1,i}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Формулы (1.10) являются рекуррентными, т.е. справедливыми для любого блика, за исключением тех, в точке расположения которых расположен ТИ.

Формула для определения  $\alpha_{wp}$  двух элементов имеет вид [15]:

$$\alpha_{wp} = \frac{1}{l_w l_p} \int_{l_w} \int_{l_p} f'_{0w} f'_{0p} \Psi_{(wp)} dl_w dl_p. \quad (1.11)$$

Сопротивление ЗУ находится в прямой зависимости от  $\rho$  грунта, в котором расположен заземлитель. И поэтому, его точное определение необходимо для того, чтобы правильно рассчитать параметры ЗУ.

Рассмотрим пример части расчета функции пропорциональности  $\Psi$  между током, выходящим из точечного источника и потенциалом в точке N проводящего полупространства в трехслойной электрической структуре по методу оптической аналогии с параметрами:  $\rho_1 = 100, \rho_2 = 300, \rho_3 = 200$  Ом·м,  $h_1=3, h_2=2$  м. Точечный источник тока расположен на границе между первым и вторым слоем

( $t=3$  м). Координаты точки NN:  $r_{NN}=2$ ,  $z_{NN}=0,5$  м. Наибольшая общая мера толщин слоев  $\omega=1$ м;  $p_1=3$ ;  $p_2=2$ . Оптические коэффициенты;  $a_{1,0}=1$ ;  $b_{1,0}=0$ ;  $a_{1,2}=0,5$ ;  $b_{1,2}=0,5$ ;  $a_{2,1}=-0,5$ ;  $b_{2,1}=1,5$ ;  $a_{2,3}=-0,2$ ;  $b_{2,3}=1,2$ .

Интенсивность лучей исходного источника света:  $q'_{1,0}=1+a_{1,2}=1+0,5=1,5$ ;  $q_{1,0}=b_{1,2}=0,5$  Рекуррентные формулы по границам полупространства ( $j=0$ ) и слоев ( $j=1; 2$ ) [15]:

$$q_{0,k} = q'_{1,k-p_1} a_{1,0}; q'_{0,k} = 0 \text{ при } j=0;$$

$$\left. \begin{aligned} q_{1,k} &= q'_{0,k-p_1} b_{1,2} + q'_{2,k-p_2} a_{2,1} \\ q'_{1,k} &= q'_{0,k-p_1} a_{1,2} + q'_{2,k-p_2} b_{2,1} \end{aligned} \right\} \text{ при } j=1;$$

$$\left. \begin{aligned} q_{2,k} &= q'_{1,k-p_2} b_{2,3} \\ q'_{2,k} &= q'_{1,k-p_2} a_{2,3} \end{aligned} \right\} \text{ при } j=2; \quad (1.12)$$

На рисунке 1.7 показана схема лучей (бликов), интенсивности которых рассчитаны по рекуррентным формулам (1.12) и сведены в таблицу, представленную на рисунке 1.7.

Точка NN расположена в первом слое. Поэтому

$$\Psi(r_{NN}, z_{NN}, \eta=t) = \frac{\rho_i}{4\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \left[ \frac{q_{0,k}}{\sqrt{r_{NN}^2 + (k\omega + z_{NN})^2}} + \frac{q'_{i,k}}{\sqrt{r_{NN}^2 + (k\omega - z_{NN} + h_1)^2}} \right] \approx 79 \text{ Ом}$$

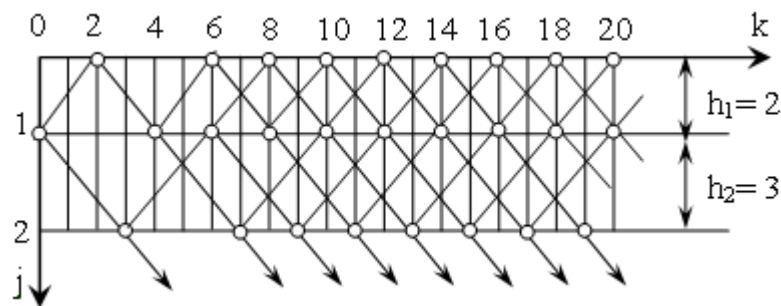


Рисунок 1.7 – Схема лучей и бликов: О - точки, в которых появляются блики

Рассмотрим второй пример (цитировано из [26]). Пусть дано исходное 3-слойное проводящее полупространство со следующими параметрами:  $h_1=1$  м;  $h_2=2$  м;  $h_3=\infty$ ;  $r_1=100$ ;  $r_2=200$ ;  $r_3=300$  Ом/м.

В первом случае рассчитаем потенциал в точке  $r=5$  м (расстояние от точечного источника),  $z=2$  м (глубина точки) от источника на глубине  $t=1$  м, т.е. источник расположен на границе между 1-м и 2-м слоями. Общая мера слоев  $w$  в данном

случае равна 1м. Произведем последовательный расчет потенциала в точке, постепенно увеличивая в формуле (1.9) число членов ряда  $m$  от 1 до достижения достаточной точности расчета, т.е. до тех пор, пока увеличение  $m$  перестанет приводить к изменению результата расчета.

Результаты сведены в таблицу 1.1 (строка Y1) и отображены на графике рисунка 1.7.

Таблица 1.1

К	1	2	5	10	20	30	50	100	150	200	300	500
Y1	2,08	4,87	5,83	6,80	7,03	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05
Y2	3,13	2,09	2,09	2,09	2,09	4,87	5,82	6,60	6,94	7,01	7,04	7,04

Видно, что для точного расчета в первом случае достаточно порядка 30-ти членов ряда, дальнейшее увеличение  $m$  уже практически не сказывается на результате расчета.

Для второго случая примем глубину залегания источника тока равной 1,1 м, т.е. теперь источник не расположен на границе исходной структуры полупространства и, следовательно, нам необходимо ввести фиктивную границу на глубине 1,1 м. Общая мера слоев в данном случае равна 0,1 м. Произведем расчет потенциала в той же точке (на расстоянии 5 м от источника и на глубине 2 м). Результаты также сведены в таблице 1.1 (строка Y2) и отображены на графике рис 1.9 (линия 2). Для достижения точного результата в данном случае необходимо около 300 членов бесконечного ряда формулы (1.9). Очевидно, что если расположить источник еще ближе к какой-либо границе исходного полупространства, то требуемое количество членов ряда будет еще большим, что приведет к еще большим трудностям при расчете.

**Модификация метода оптической аналогии** (цитировано из [26])

Выход из данной ситуации может быть найден в отказе от введения фиктивной границы на глубине источника, т.е. общая мера слоев не должна учитывать глубину источника, а только мощности слоев исходной структуры грунта. Это возможно осуществить путем замены исходного источника тока двумя (если источник расположен не в пределах последнего слоя) или одним, когда глубина источника ниже последней границы слоев. Эти «вторичные» источники тока образуются первыми

пересечениями лучей от исходного источника с границами слоев (рис 1.8).



Рисунок 1.8 – Замена исходного источника двумя «вторичными»

Затем расчет ведется дважды – от каждого из «вторичных» источников (если их два), или один раз в случае только одного «вторичного» источника, когда «вторичные» источники тока по определению располагаются на границах и общая мера слоев не учитывает глубины их залегания, т.к. фиктивная граница не вводится. При этом "вторичные" источники не расположены на вертикали  $k=0$ , и необходимо учесть их "приближение" к рассчитываемой точке. Это выполняется путем ввода в формулу (1.9) величины  $d\omega$ - расстояния от источника до границы, на которой образовался "вторичный" источник:

$$\Psi = \frac{\rho_i}{4\pi} \sum_{j=1}^2 \sum_{k=0}^m \left[ \frac{q_{i-1,k}}{\sqrt{r_N^2 + (k\omega + d\omega_j + z_N - h_{i-1})^2}} + \frac{q'_{i,k}}{\sqrt{r_N^2 + (k\omega + d\omega_j - z_N + h_{i-1})^2}} \right] \quad (1.9a)$$

В общем случае, при расположении источника не в последнем слое, расчет ведется дважды по формуле (1.9 а) с учетом величины  $d\omega$ . Потенциал в точке находится как сумма потенциалов от "вторичных" источников тока. Кроме того, если точка расположена в том же слое, что и исходный источник, то учитывается и его интенсивность.

Для подтверждения вышесказанного произведем расчет при тех же начальных условиях, как и во втором случае для не модифицированного метода. Поскольку фиктивная граница не вводится, то общая мера слоев равна  $\omega=1$  м. Результаты расчета отображены на рис. 1.9 вместе с графиками первых двух примеров.

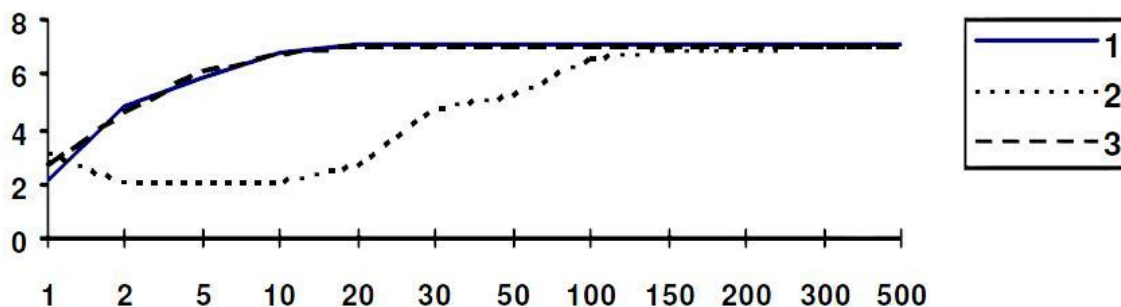


Рисунок 1.9 – Графики сходимости расчета точечного источника

(1 - источник расположен на границе, 2 - источник расположен не на границе (не модифицированный метод), 3 - источник расположен не на границе (модифицированный метод))

Необходимое число членов бесконечного ряда формулы (1.9 а) примерно приравнять 30, как и в случае не модифицированного метода. Получим, что значительно сокращается число членов бесконечного ряда (в 10 раз), необходимого для точного расчета.

Метод оптической аналогии при сложной модели грунта требует больших затрат машинного времени. Данная доработка этого метода позволяет сократить время расчета при сохранении точности. Модификация заключается во введении фиктивных источников вместо исходного источника тока, что позволило отказаться от введения фиктивной границы, уменьшить время расчета в десятки раз и упростить сам расчет.

### 1.3 Методы определения удельного электрического сопротивления грунта

При расчете и устройстве заземлений необходимо знать удельное сопротивление  $\rho$  грунта. В ПУЭ рекомендуется в качестве расчетного брать наибольшее в течение года значение  $\rho$ , т.е. ориентироваться на худший вариант. Соответственно, чем  $\rho$  меньше, тем благоприятнее условия для расположения заземлителя [14]. В зависимости от состава (песок, глина и т.п.), размеров и плотности прилегания друг к другу частиц, влажности и температуры  $\rho$  грунтов изменяется в очень



широких пределах. Наиболее важными факторами, влияющими на величину  $\rho$  грунта, являются влажность и температура [14], а также плотность. Задача выявления их влияния до сих пор актуальна.

Основной проводник тока в грунте это влага, поэтому сухой грунт любого вида тока практически не проводит, и вид грунта сильно не влияет на его удельное сопротивление [14]. Если грунт увлажняется, то его сопротивление уменьшается, но в разной мере, в зависимости от количества растворимых веществ, от дисперсности и способности удерживать свободную воду. Например, песок очень быстро лишается влаги, в то время как глина удерживает ее долго [27]. Приведем краткие характеристики некоторых грунтов важные для выбора устройств заземления. Глина – порода, состоящая из плотных и очень мелких частиц, образующих с водой массу, хорошо задерживающую влагу, обладает весьма малой пористостью; при обычной влажности имеет относительно низкое сопротивление; является хорошим грунтом для устройства заземлений [14]. Песок – рыхлая смесь зерен горных пород, имеет пористую структуру, обладает большой плотностью и очень малой влагоемкостью. При обычной влажности имеет высокое сопротивление и является плохим грунтом для устройства заземлений. Супесь больше похожа на песок с примесью небольшого количества глины. Чернозем – рыхлая почва с большими влагоемкостью и содержанием перегноя [28]. Он часто имеет удельное сопротивление, близкое к сопротивлению глины, и поэтому его используют для устройства заземлений.

Горные породы, различные структуры земли и естественные водные среды это полупроводники. Для водосодержащих пород удельные сопротивления представлены в приложении А [9].

Электропроводность грунта при обычных температурах определяется количеством присутствующей в нем воды, ее минерализацией и характером распределения ее в породе. Влага, содержащаяся во влажном грунте, является электролитом. С ростом температуры  $t$  его  $\rho$  уменьшается, так как с повышением  $t$  увеличивается степень диссоциации молекул веществ, растворенных в воде. Однако эта

закономерность сохраняется до тех пор, пока влага не начнет испаряться. Испарение влаги грунта происходит под воздействием температуры окружающего воздуха или из-за сильного ветра, который поднимает влагу из грунта [29]. В этом случае влаги лишается лишь верхний слой грунта толщиной 50-60 см. Поэтому при устройстве заземлений в целях экономии металла заземлители размещают в земле ниже этого уровня [9].

Точное определение  $\rho$  - сложная задача, которую в настоящее время нельзя считать решенной. При расчетах сопротивления ЗУ правила устройств электроустановок (ПУЭ) рекомендует брать  $\rho$ , измеренное, как правило, в летнее время и умноженное на поправочные коэффициенты, которые должны учитывать наихудшие климатические условия. Однако они дают лишь приблизительную картину изменения  $\rho$  в зависимости от перечисленных параметров [30]. Например, расчет  $\rho$  в зависимости от влажности определяется по формуле [9]:

$$\rho = a_* \rho_w \Phi^{-m_*} S^{-n_*} \quad (1.13)$$

где  $\rho_w$  – удельное электрическое сопротивление содержащейся в породе воды;  $\Phi$  - пористость;  $S$  – доля порового объема, заполненного водой;  $a_*, m_*, n_*$  – числа полученные эмпирически.  $m_*$  принимается от 1,3 для рыхлого песка до 2,5 для плотно сцементированной зернистой породы. В приложении Б представлены значения  $\Phi$ ,  $a_*, m_*$  для водосодержащих пород [9]. Если вода заполняет более 30% порового пространства, то  $n_*=20$ , если же зерна минералов не смочены, то параметр  $n_*=10$ . В приложении В представлены значения  $\rho$  грунтовых вод, верхнего слоя земли мощностью до 50 м [9] и пределы его изменений для разных типов грунтов [31].

Удельное сопротивление  $\rho$  грунта также зависит от температуры, и приближенно эта зависимость выражается формулой [9]:

$$\rho_t = \rho_{20} e^{-0,022(t-20)} \quad (1.14)$$

где  $\rho_t, \rho_{20}$  – сопротивления при температурах  $t$  и  $20^\circ\text{C}$  соответственно.

Как показывают экспериментальные данные [30], представленные эмпирические зависимости применимы лишь для определенного диапазона значений какого-либо из параметров или для определенного вида грунта. Формула (1.14) работает на интервале температур от  $4^\circ\text{C}$  до  $24^\circ\text{C}$  (ошибка составляет 4%), но от  $4^\circ\text{C}$  и ниже она начинает давать большую погрешность, а в отрицательном диапазоне вообще неприменима, как утверждают и ее авторы. Эмпирическая формула расчета  $\rho$  в зависимости от влажности (1.13) не работает для таких видов грунта как песок, супесь, суглинок, глина и почва.

В справочниках и в ПУЭ приводятся ориентировочные значения  $\rho$ , которые могут отличаться от истинных в десятки и сотни раз [30]. Измерение же его в самое неблагоприятное время (зимой) на практике связано с серьезными затруднениями. Поэтому эти измерения проводят в летнее время [14]. Для измерения  $\rho$  однородного грунта используется метод разового (глубокого) зондирования [14] с помощью контрольного зонда с диаметром  $d_3=4\text{-}5\text{см}$ . Его погружают в землю вертикально на глубину  $l_3$ , м предлагаемого заложения заземлителя, и измеряют его сопротивление  $R_{\text{изм}}$ , Ом. Затем вычисляют измеренное значение  $\rho$  по формуле:  $\rho_{\text{изм}} = R_{\text{изм}} 2\pi l_3 / \ln(4l_3 / d_3)$  Ом·м. Для большей точности измерений этот зонд погружают в землю в трех-четырех местах исследуемой площадки, и в качестве расчетного  $R_{\text{изм}}$  принимают среднее арифметическое значение. Для многослойного грунта используется метод послойного (ступенчатого) зондирования [14] с помощью контрольного зонда, погружаемого в землю в несколько приемов участками длиной  $h_{n3} = 0,5\text{--}1,5\text{м}$ . Каждый участок представляет собой отдельный слой грунта со своим  $R_{n,\text{изм}}$  при глубине  $l_{n3}$ . Измеренное  $\rho$ , соответствующее данной глубине погружения

зонда, определяется по формуле, Ом·м:  
 $\rho_{n,uzm} = R_{n,uzm} 2\pi l_z / \ln(4l_z / d_z)$ . После чего вычисляются  $\rho$  каждого слоя грунта:  $\rho_{n,uzm} = h_{nz} / (l_{nz} / \rho_{n,uzm} - l_{(n-1)z} / \rho_{n-1,uzm})$ . Полученное значение  $\rho$  умножается на коэффициент сезонности [14]. Этот метод часто используется, т.к. дает более точный результат. Как видно, это очень трудоемкие измерения, и проводить зимой их весьма сложно.

В последнее время разработана методика [30] для определения  $\rho$  грунта с учетом влажности и температуры с применением нечеткой логики [32]. Для понимания дальнейшего материала рассмотрим теорию нечетких множеств (НМ) (fuzzy sets) [33-34], которая позволяет решать задачи с нечеткими исходными данными.

#### 1.4 Вопросы для проверки знаний

1. Как определяется сопротивление простых и сложных заземлителей?
2. Область применения защитного сопротивления.
3. Перечислите меры по уменьшению сопротивления заземлителей.
4. Какие ограничения используются при проектировании ЗУ для тех или иных значений удельного электрического сопротивления  $\rho$  грунта?
5. Преимущества и недостатки метода вертикального электрического зондирования ВЭЗ и метода разового зондирования (метод простого пробного электрода), в чем их различие?
6. Порядок расчета сопротивлений заземлителей.
7. Первая помощь пострадавшим от электрического тока.
8. Виды поражений электрическим током.
9. От каких параметров зависит изменение удельного электрического сопротивления грунта?
10. По каким формулам принято рассчитывать удельное электрическое сопротивление грунта?
11. Какова зависимость удельного электрического сопротивления грунта от влажности и температуры?

## 2 ОСНОВЫ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Математическая теория нечетких множеств (НМ) (fuzzy sets) и нечеткая логика (fuzzy logic) [32-35] являются обобщениями классической теории множеств и классической формальной логики. Данные понятия были впервые предложены американским ученым Лотфи А. Заде (Lotfi Zadeh) в 1965 г. [36]. Его работа «Fuzzy Sets» в журнале *Information and Control*, №8, заложила основы моделирования интеллектуальной деятельности человека и явилась начальным толчком к развитию новой математической теории. Этот аппарат включает в себя нечеткость и неопределенность выражений. Для решения сложных процессов, в которых данные, цели и ограничения являлись слишком сложными или плохо определенными для того, чтобы допустить точный математический анализ, используется аппарат НМ [37-38]. Л. Заде расширил классическое канторовское понятие множества, допустив, что характеристическая функция (функция принадлежности элемента множеству) может принимать любые значения в интервале  $[0,1]$ , а не только значения 0 или 1.

Математическая теория нечетких множеств позволяет описывать нечеткие понятия и знания, оперировать этими знаниями и делать нечеткие выводы. Здесь допускаются результаты несколько размытые или неопределенные. Это обеспечивает эффективные средства отображения неопределенностей и неточностей реального мира. Наличие математических средств отражения такой исходной информации позволяет построить модель, адекватную реальности. Использование нечеткости при построении условных высказываний позволяет формально включать в них знания экспертов, выраженные вербальными категориями типа «влажно», «сухо», «сильно влажно» и т.п. Нет четкой границы между понятиями «влажно» и «сухо». Именно в этом и проявляется нечеткость задания соответствующего множества.

Преимущества fuzzy-систем по сравнению с другими: 1) возможность оперировать нечеткими входными данными: например, непрерывно изменяющимися во времени значениями

(динамические задачи), которые невозможно задать однозначно; 2) возможность нечеткой формализации критериев оценки и сравнения: оперирование критериями "большинство", "возможно", "преимущественно" и т.д.; 3) возможность проведения качественных оценок, как входных данных, так и выходных результатов: оперируются не только значения данных, но и их степень достоверности; 4) возможность проведения быстрого моделирования сложных динамических систем и их сравнительного анализа с заданной степенью точности: оперируя принципами поведения системы, описанными fuzzy-методами. Во-первых, не тратится много времени на выяснение точных значений переменных и составление описывающих уравнений, во-вторых, оцениваются разные варианты выходных значений.

Нечеткое моделирование выполняется по следующим этапам: 1) анализ факторов, создающих проблемную ситуацию в системе, 2) структуризация этой ситуации и построение нечеткой модели, 3) выполнение вычислительных экспериментов или наблюдений с нечеткой моделью, 4) использование полученных результатов, 5) корректировка и доработка полученной модели.

## 2.1 Нечеткие множества

Пусть  $E$  – универсальное множество,  $x$  – элемент  $E$ , а  $r$  – некоторое свойство. Обычное (четкое) подмножество  $A$  универсального множества  $E$ , элементы которого удовлетворяют свойству  $r$ , определяется как множество упорядоченных пар  $A = \{A(x)/x\}$ , где  $\mu_A(x)$  – характеристическая функция, принимающая значение 1, если  $x$  удовлетворяет свойству  $r$ , и 0 – в противном случае [36].

Нечеткое подмножество отличается от обычного тем, что для элементов  $x$  из  $E$  нет однозначного ответа «да-нет» относительно свойства  $r$ . В связи с этим нечеткое подмножество  $A$  универсального множества  $E$  определяется как множество упорядоченных пар  $A = \{A(x)/x\}$ , где  $\mu_A(x)$  – характеристическая функция принадлежности (или просто функция принадлежности), принимающая значения в некотором вполне упорядоченном множестве  $M$  (например,  $M=[0; 0,2; 0,5; 0,8; 1]$ ).

Функция принадлежности указывает степень

принадлежности элемента  $x$  подмножеству  $A$ . Множество  $M$  называют множеством принадлежностей. Если  $M=\{0;1\}$ , то нечеткое подмножество может рассматриваться как обычное или четкое множество.

**Основные характеристики нечетких множеств** [36]. Пусть  $M=[0,1]$  и  $A$  – нечеткое множество с элементами из универсального множества  $E$  и множеством принадлежностей  $M$ .

Величина  $\sup_{x \in E} \mu_A(x)$  – называется высотой нечеткого множества  $A$ . Нечеткое множество  $A$  нормально, если его высота равна 1, т.е. верхняя граница его функции принадлежности равна 1 ( $\sup_{x \in E} \mu_A(x)=1$ ). При  $\sup_{x \in E} \mu_A(x) < 1$  нечеткое множество называется субнормальным.

Нечеткое множество пусто, если  $\forall x \in E \mu_A(x) = 0$ . Непустое субнормальное множество можно нормализовать по формуле:

$$\mu_A(x) := \frac{\mu_A(x)}{\sup_{x \in E} \mu_A(x)}.$$

Нечеткое множество унимодально, если  $\mu_A(x)=1$  только на одном  $x$  из  $E$ .

Носителем нечеткого множества  $A$  является обычное подмножество со свойством  $\mu_A(x) > 0$ , т.е. носитель  $A = \{x / x \in E, \mu_A > 0\}$ .

Элементы  $x \in E$  для которых  $\mu_A(x)=0,5$ , называются точками перехода множества  $A$ .

**Пример.** Пусть  $E = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$   $M = [0, 1]$ ;  $A$  – нечеткое множество, для которого  $\mu_A(x_1) = 0,3$ ;  $\mu_A(x_2) = 0$ ;  $\mu_A(x_3) = 1$ ;  $\mu_A(x_4) = 0,5$ ;  $\mu_A(x_5) = 0,9$ . Тогда  $A$  можно представить в виде:

$$A = \{0,3/x_1; 0/x_2; 1/x_3; 0,5/x_4; 0,9/x_5\},$$

$$\text{или } A = \{0,3/x_1 + 0/x_2 + 1/x_3 + 0,5/x_4 + 0,9/x_5\},$$

Замечание. Здесь знак «+» не является обозначением операции сложения, а имеет смысл объединения.

### Примеры нечетких множеств

1. Пусть  $E = \{0, 1, 2, \dots, 10\}$ ,  $M = [0, 1]$ . Нечеткое множество «Несколько» можно определить следующим образом: «Несколько» =  $0,5/3 + 0,8/4 + 1/5 + 1/6 + 0,8/7 + 0,5/8$ ; его характеристики: высота = 1, носитель =  $\{3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ ,

точки перехода -  $\{3, 8\}$ .

2. Пусть  $E = \{0, 1, 2, 3, \dots, n, \dots\}$ . Нечеткое множество «Малый» можно определить:

$$\text{«Малый»} = \{ \mu_{\text{малый}}(n) = \frac{1}{1+(n/10)^2} / n \}, n \neq 0$$

3. Пусть  $E = \{1, 2, 3, \dots, 100\}$  и соответствует понятию «Возраст». Тогда множество «Молодой» может быть

определено с помощью 
$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \in [1, 25], \\ \frac{1}{1+((x-25)/5)^2}, & x > 25. \end{cases}$$

Нечеткое множество «Молодой» на универсальном множестве  $E' = \{\text{ИВАНОВ, ПЕТРОВ, СИДОРОВ, \dots}\}$  задается с помощью функции принадлежности  $\mu(x)$  на  $E = \{1, 2, 3, \dots, 100\}$  (возраст), называемой по отношению к  $E'$  функцией совместимости, при этом:

$$\mu(\text{СИДОРОВ}) := \mu(x),$$

где  $x$  — возраст СИДОРОВА.

4. Нечеткое множество  $A$ , соответствующее нечеткому понятию «средний уровень напряжения в узле сети 220 кВ» [37].

$$A = \{0,05/205; 0,2/210; 0,5/215; 0,8/218; 0,9/219; 1,0/220; 0,9/221; 0,8/222; 0,5/225; 0,2/230; 0,05/235\}.$$

Уровень напряжения узла сети ниже 205 кВ и выше 235 кВ не может быть охарактеризован понятием «средний» в сети 220 кВ. Числа 0,05, 0,2, 0,5 и т.д. — значения функции принадлежности  $\mu(U)$ .

## 2.2 Операции над нечеткими множествами

### Логические операции [36]

*Включение.* Пусть  $A$  и  $B$  — нечеткие множества на универсальном множестве  $E$ . Говорят, что  $A$  содержится в  $B$ , если  $\forall x \in E \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$  [35].

Обозначение:  $A \subset B$ .

Иногда используют термин *доминирование*, т.е. в случае, когда  $A \subset B$ , говорят, что  $B$  доминирует  $A$ .

Равенство.  $A$  и  $B$  равны, если  $\forall x \in E \mu_A(x) = \mu_B(x)$ .

Обозначение:  $A = B$ .

*Дополнение.* Пусть  $M = [0, 1]$ ,  $A$  и  $B$  — нечеткие множества, заданные на  $E$ .  $A$  и  $B$  дополняют друг друга, если  $\forall x \in E$



$$\mu_A(x) = 1 - \mu_B(x).$$

Обозначение:  $B = \bar{A}$  или  $A = \bar{B}$ .

Очевидно, что  $A = \bar{\bar{A}}$  (дополнение определено для  $M = [0, 1]$ , но очевидно, что его можно определить для любого упорядоченного  $M$ ).

*Пересечение* [35].  $A \cap B$  - наибольшее нечеткое подмножество, содержащееся одновременно в  $A$  и  $B$ :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)).$$

*Объединение*.  $A \cup B$  - наименьшее нечеткое подмножество, включающее как  $A$ , так и  $B$ , с функцией принадлежности:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)).$$

*Разность*.  $A - B = A \cap \bar{B}$  с функцией принадлежности:

$$\mu_{A-B}(x) = \mu_{A \cap \bar{B}}(x) = \min(\mu_A(x), 1 - \mu_B(x))$$

*Дизъюнктивная сумма*

$$A \oplus B = (A - B) \cup (B - A) = (A \cap \bar{B}) \cup (\bar{A} \cap B) \quad \text{с функцией}$$

принадлежности:

$$\mu_{A \oplus B}(x) = \max(\min(\mu_A(x), 1 - \mu_B(x)); \min(1 - \mu_A(x), \mu_B(x))).$$

*Примеры*. Пусть

$$A = 0,4/x_1 + 0,2/x_2 + 0/x_3 + 1/x_4$$

$$B = 0,7/x_1 + 0,9/x_2 + 0,1/x_3 + 1/x_4$$

$$C = 0,1/x_1 + 1/x_2 + 0,2/x_3 + 0,9/x_4$$

Здесь:

1)  $A \subset B$ , т.е.  $A$  содержится в  $B$  или  $B$  доминирует  $A$ ;  $C$  несравнимо ни с  $A$ , ни с  $B$ , т.е. пары  $\{A, C\}$  и  $\{B, C\}$  – пары недоминируемых нечетких множеств.

2)  $A \neq B \neq C$ .

3)

$$\bar{A} = 0,6/x_1 + 0,8/x_2 + 1/x_3 + 0/x_4; \quad \bar{B} = 0,3/x_1 + 0,1/x_2 + 0,9/x_3 + 0/x_4.$$

4)  $A \cap B = 0,4/x_1 + 0,2/x_2 + 0/x_3 + 1/x_4$ .

5)  $A \cup B = 0,7/x_1 + 0,9/x_2 + 0,1/x_3 + 1/x_4$ .

6)  $A - B = A \cap \bar{B} = 0,3/x_1 + 0,1/x_2 + 0/x_3 + 0/x_4$ ;

$B - A = \bar{A} \cap B = 0,6/x_1 + 0,8/x_2 + 0,1/x_3 + 0/x_4$ .

7)  $A \oplus B = 0,6/x_1 + 0,8/x_2 + 0,1/x_3 + 0/x_4$ .

*Свойства операций  $\cap$  и  $\cup$*

Пусть  $A, B, C$  – нечеткие множества, тогда выполняются следующие свойства [36]:

1)  $A \cup B = B \cup A$   
 $A \cap B = B \cap A$  - коммутативность;

- 2)  $\left. \begin{aligned} (A \cup B) \cup C &= A \cup (B \cup C) \\ (A \cap B) \cap C &= A \cap (B \cap C) \end{aligned} \right\}$  - ассоциативность;
- 3)  $\begin{aligned} A \cup A &= A \\ A \cap A &= A \end{aligned}$  - идемпотентность;
- 4)  $\left. \begin{aligned} A \cap (B \cup C) &= (A \cap B) \cup (A \cap C) \\ A \cup (B \cap C) &= (A \cup B) \cap (A \cup C) \end{aligned} \right\}$  - дистрибутивность;
- 5)  $A \cup \emptyset = A$ , где  $\emptyset$  – пустое множество;
- 6)  $A \cap \emptyset = \emptyset$ ;
- 7)  $A \cap E = A$ , где  $E$  – универсальное множество;
- 8)  $A \cup E = E$ ;
- 9)  $\left. \begin{aligned} \overline{A \cap B} &= \overline{A} \cup \overline{B} \\ \overline{A \cup B} &= \overline{A} \cap \overline{B} \end{aligned} \right\}$  - теоремы де Моргана.

### Алгебраические операции [36]

Алгебраическое произведение  $A$  и  $B$  обозначается  $A \cdot B$  и определяется так [36]:  $\forall x \in E \mu_{A \cdot B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$ .

Алгебраическая сумма этих множеств обозначается  $A \hat{+} B$  и определяется так:  $\forall x \in E \mu_{A \hat{+} B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$ . Для операций  $\{\cdot, \hat{+}\}$  выполняются свойства:

1) коммутативность -

$$A \cdot B = B \cdot A,$$

$$A \hat{+} B = B \hat{+} A;$$

2) ассоциативность -

$$(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$$

$$(A \hat{+} B) \hat{+} C = A \hat{+} (B \hat{+} C)$$

3)  $A \cdot \emptyset = \emptyset$ ,  $A \hat{+} \emptyset = A$ ,  $A \cdot E = A$ ,  $A \hat{+} E = E$ ;

4) теоремы де Моргана -

$$\overline{A \cdot B} = \overline{A} \hat{+} \overline{B},$$

$$\overline{A \hat{+} B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$$

На основе операции алгебраического произведения определяется операция *возведения в степень*  $\alpha$  нечеткого множества  $A$ , где  $\alpha$  – положительное число. Нечеткое множество  $A^\alpha$  определяется функцией принадлежности  $\mu_{A^\alpha} = \mu_A^\alpha(x)$ . Частными случаями возведения в степень являются [36]:

1)  $\text{CON}(A) = A^\alpha$  – операция *концентрирования* (уплотнения);

2)  $\text{DIL}(A) = A^{0,5}$  – операция *растяжения*, которые используются при работе с лингвистическими неопределенностями.

*Умножение на число.* Если  $\alpha$  – положительное число, такое, что  $\alpha \max \mu_A(x) \leq 1$ , то нечеткое множество  $\alpha A$  имеет функцию принадлежности:  $\mu_{\alpha A}(x) = \alpha \mu_A(x)$

*Выпуклая комбинация нечетких множеств* [36]. Пусть  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – нечеткие множества универсального множества  $E$ , а  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  – неотрицательные числа, сумма которых равна 1.

Выпуклой комбинацией  $A_1, A_2, \dots, A_n$  называется нечеткое множество  $A$  с функцией принадлежности:  $\forall x \in E$   
 $\mu_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = w_1 \mu_{A_1}(x) + w_2 \mu_{A_2}(x) + \dots + w_n \mu_{A_n}(x)$

*Декартово (прямое) произведение нечетких множеств.* Пусть  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – нечеткие подмножества универсальных множеств  $E_1, E_2, \dots, E_n$  соответственно. Декартово, или прямое произведение  $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$  является нечетким подмножеством множества  $E = E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n$  с функцией принадлежности:  $\mu_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n))$

*Оператор увеличения нечеткости* [36] используется для преобразования четких множеств в нечеткие и для увеличения нечеткости нечеткого множества.

Пусть  $A$  – нечеткое множество,  $E$  – универсальное множество и для всех  $x \in E$  определены нечеткие множества  $K(x)$ . Совокупность всех  $K(x)$  называется ядром оператора увеличения нечеткости  $\Phi$ . Результатом действия оператора  $\Phi$  на нечеткое множество  $A$  является нечеткое множество вида

$$\Phi(A, K) = \bigcup_{x \in E} \mu_A(x) K(x),$$

где  $\mu_A(x) K(x)$  – произведение числа на нечеткое множество. Пример. Пусть

$$E = \{1, 2, 3, 4\}; \quad A = 0,8/1 + 0,6/2 + 0/3 + 0/4; \quad K(1) = 1/1 + 0,4/2;$$

$$K(2) = 1/2 + 0,4/1 + 0,4/3; \quad K(3) = 1/3 + 0,5/4; \quad K(4) = 1/4.$$

Тогда

$$\Phi(A, K) = \mu_A(1)K(1) \cup \mu_A(2)K(2) \cup \mu_A(3)K(3) \cup \mu_A(4)K(4) =$$

$$= 0,8(1/1 + 0,4/2) \cup 0,6(1/2 + 0,4/1 + 0,4/3) = 0,8/1 + 0,6/2 + 0,24/3.$$

### 2.3 Нечеткая и лингвистическая переменные

Для описания НМ вводится понятия нечеткой (НП) и лингвистической переменной (ЛП), значением которой являются не числа, а слова естественного языка, называемые терминами [33,38].

*Нечеткая переменная* характеризуется тройкой  $(a, X, A)$ , где  $a$  - наименование переменной;

$E$  - универсальное множество (область определения  $a$ );

$A$  - нечеткое множество на  $E$ , описывающее ограничения (т.е.  $\mu_A(x)$ ) на значения нечеткой переменной  $a$ .

*Лингвистической переменной* (ЛП) называется набор  $(\beta, T, X, G, M)$ , где

$\beta$  - наименование лингвистической переменной;

$T$  - множество ее значений (терм-множество), представляющих собой наименования нечетких переменных, областью определения каждой из которых является множество  $X$ . Множество  $T$  называется базовым *терм-множеством* лингвистической переменной;

$G$  - синтаксическая процедура, по которому генерируются новые термы с применением слов естественного или формального языка, позволяет оперировать элементами терм-множества  $T$ , в частности, генерировать новые термы (значения). Множество  $T \cup G(T)$ , где  $G(T)$  - множество сгенерированных термов, называется расширенным терм-множеством лингвистической переменной; Другими словами  $R_n$  - процедура образования новых термов с помощью связок "и", "или" и модификаторов типа "очень", "не", "слегка" и др. Например "очень сильно влажный", "слегка влажный" и др.;

$M$  - семантическая процедура, ее еще называют процедурой экспертного опроса, которое каждому значению лингвистической переменной ставит в соответствие нечеткое подмножество множества  $E_n$ . Например,  $M_{n1}$  - процедура задания на  $E_n = [0,2]$  нечеткое подмножество  $A_{n1} = \text{"сухой"}$ ,  $M_{n2}$  - на  $E_n = [2,6]$   $A_{n2} = \text{"влажный"}$ .

**Замечание.** Чтобы избежать большого количества символов:

- символ  $\beta$  используют как для названия самой переменной, так и для всех ее значений;

-пользуются одним и тем же символом для обозначения нечеткого множества и его названия, например терм

«Молодой», являющийся значением лингвистической переменной  $\beta =$  «возраст», одновременно есть и нечеткое множество  $M$  («Молодой»).

Присвоение нескольких значений символам предполагает, что контекст позволяет разрешить возможные неопределенности.

**Пример** [36]. Пусть эксперт определяет толщину выпускаемого изделия с помощью понятий «Малая толщина», «Средняя толщина» и «Большая толщина», при этом минимальная толщина равна 10мм, а максимальная – 80 мм.

Формализация такого описания может быть проведена с помощью следующей лингвистической переменной ( $\beta, T, X, G, M$ ), где  $\beta$  - толщина изделия;

$T$  - {«Малая толщина», «Средняя толщина», «Большая толщина»};

$X$  - [10, 80];

$G$  - процедура образования новых термов с помощью связок «и», «или» и модификаторов типа «очень», «не», «слегка» и т.п. Например: «Малая или средняя толщина», «Очень малая толщина» и т.д.;

$M$  - процедура задания на  $X = [10, 80]$  нечетких подмножеств  $A_1 =$  «Малая толщина»,  $A_2 =$  «Средняя толщина»,  $A_3 =$  «Большая толщина», а также нечетких множеств для термов из  $G(T)$  в соответствии с правилами трансляции нечетких связок и модификаторов «и», «или», «не», «очень», «слегка» и других операций над нечеткими множествами вида:  $A \cap B, A \cup B, \bar{A}, \text{CON } A = A^2$ , и т.п.

**Замечание.** Наряду с рассмотренными выше базовыми значениями лингвистической переменной «Толщина» ( $T =$  {«Малая толщина», «Средняя толщина», «Большая толщина»}) возможны значения, зависящие от области определения  $X$ . В данном случае значения лингвистической переменной «Толщина изделия» могут быть определены как «около 20мм», «около 50мм», «около 70мм», т.е. в виде нечетких чисел.

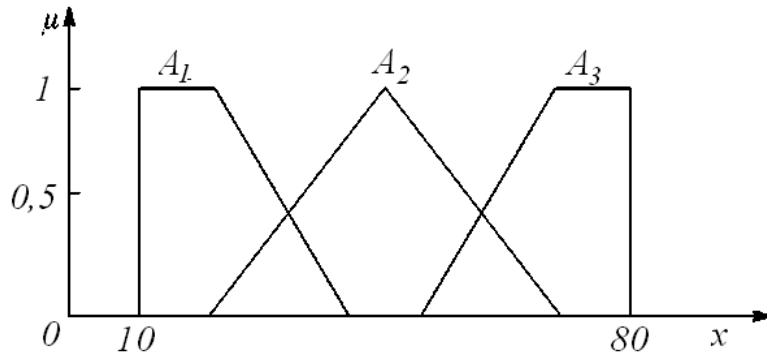


Рисунок 2.1 – Функции принадлежности нечетких множеств: «Малая толщина» =  $A_1$ , «Средняя толщина» =  $A_2$ , «Большая толщина» =  $A_3$

Терм-множество и расширенное терм-множество в условиях примера можно характеризовать функциями принадлежности, приведенными на рис. 2.1 и 2.2.

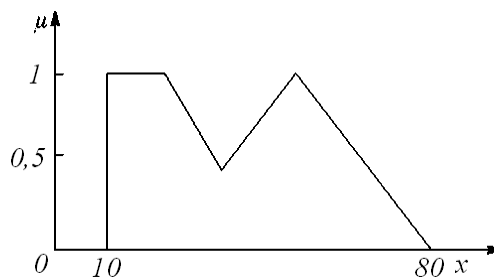


Рисунок 2.2 – Функция принадлежности нечеткого множества «Малая или средняя толщина» =  $A_1 \cup A_2$

## 2.4 Функции принадлежности

Степень принадлежности любого элемента  $v$  множеству  $E_n$  может быть оценена с помощью функции принадлежности (ФП) [38]:  $\mu(v): E_n \rightarrow [0,1]$ , которая обладает тем свойством, что в любой точке выполняется условие:  $\sum \mu_i(v) = 1$ .  $\mu(v)$  – это некоторое субъективное измерение нечеткой принадлежности элемента заданному множеству и это измерение отличается от вероятностной меры. Если  $\mu(v) = 1$ , то это означает полную принадлежность к множеству, и если  $\mu(v) = 0$  – наоборот ее отсутствие.

ФП строятся для каждого лингвистического термина [34, 38]. Для того чтобы согласовывать мнения различных экспертов,

удобно построить “гладкий” график ФП на базовой шкале области определения. Это позволит для каждого конкретного факта или события заданной области определения лучше оценивать принадлежность заданному классу. Построение “гладкой” функции по известному набору значений степени принадлежности в некоторых точках базовой шкалы, или на носителе НМ, требует использования классических методов аппроксимации. Так метод наименьших квадратов позволяет получить достаточно гладкую функцию принадлежности, которая равномерно приближается в смысле среднего квадратического отклонения к заданному набору точек. Существует свыше десятка типовых форм кривых для задания ФП. Они показаны на рисунке 2.3, которые легко применимы к решению большинства задач.

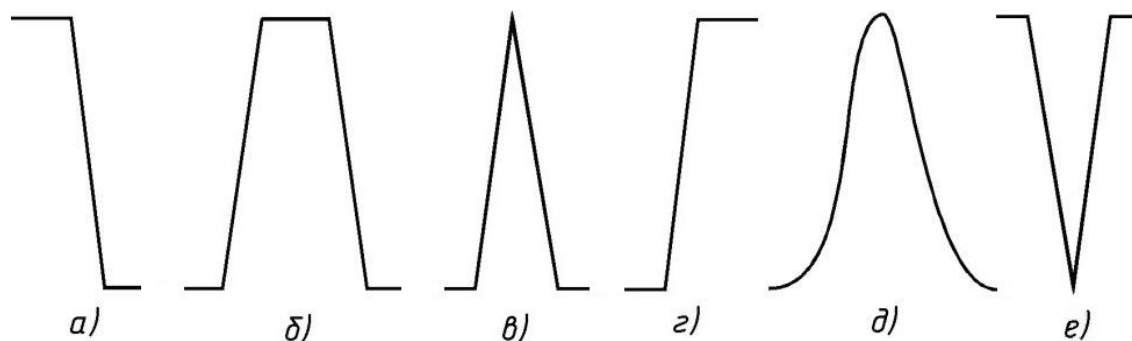


Рисунок 2.3 – Стандартные ФП: а) – Z-функция; б) - П-функция; в) – Л-функция; г) – S-функция; д) – Гауссова ФП, е) – V-функция.

Наибольшее распространение получили [35, 36, 38]: треугольная, трапецидальная и гауссова ФП. Треугольная (рисунок 2.3, в) определяется тройкой чисел  $(a, b, c)$ . Их значения в точке  $x$  вычисляются по выражениям [38]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - (b - x)/(b - a), & a \leq x \leq b \\ 1 - (x - b)/(c - b), & b \leq x \leq c \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (2.1)$$

Если это треугольная функция (Л-функция) и  $(b-a)=(c-b)$ , то она симметрична.

Функция принадлежности класса  $S$  определяется как:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (2.2)$$

Трапецеидальная функция принадлежности класса  $\Pi$  (рисунок 2.3, б) определяется через функцию класса  $S$ :

$$\mu(x) = \begin{cases} s(x; c-b, c-b/2, c), & x \leq c, \\ 1 - s(x; c; c+b/2, c+b), & x \geq c \end{cases} \quad (2.3)$$

где  $b = (a+c)/2$ . Или  $\mu(x) = \begin{cases} 1 - (b-x)/(x-a), & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ 1 - (x-c)/(d-c), & d \leq x \leq c \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$

Если трапецеидальная ФП ( $\Pi$ -функция) и  $(b-a)=(d-c)$ , то она принимает симметричный вид.

V-функция принадлежности определяется как:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a, \\ 1 - \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 1 - \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 1, & x \geq c \end{cases} \quad (2.4)$$

Следует отметить ФП Гауссова типа [34, 38] (рисунок 2.3, д), имеющую вид:

$$\mu(v) = \exp\left\{-\left[\frac{v-\sigma}{\delta}\right]^2\right\} \quad (2.5)$$

Она оперирует двумя параметрами. В этом случае параметр  $\sigma$  обозначает центр НМ, а параметр  $\delta$  отвечает за крутизну функции.

Совокупность ФП для каждого термина из базового термножества  $T_n$  изображаются вместе на одном графике, как в примере на рисунке 2.1.

### О методах построения функций принадлежности

В приведенных выше примерах использованы *прямые* методы, когда эксперт либо просто задает для каждого  $x \in E$  значение  $\mu_A(x)$ , либо определяет функцию совместимости



[36]. Как правило, прямые методы задания функции принадлежности используются для измеримых понятий, таких как скорость, время, расстояние, давление, температура и т.д., или когда выделяются полярные значения.

Во многих задачах при характеристике объекта можно выделить набор признаков и для каждого из них определить полярные значения, соответствующие значениям функции принадлежности, 0 или 1.

Например, в задаче распознавания лиц можно выделить шкалы, приведенные в табл. 2.1 [36].

**Таблица 2.1** – Шкалы в задаче распознавания лиц

		0	1
$x_1$	высота лба	Низкий	Высокий
$x_2$	профиль носа	Курносый	Горбатый
$x_3$	длина носа	Короткий	длинный
$x_4$	разрез глаз	Узкие	широкие
$x_5$	цвет глаз	Светлые	темные
$x_6$	форма подбородка	остроконечный	квадратный
$x_7$	толщина губ	Тонкие	толстые
$x_8$	цвет лица	Темный	светлый
$x_9$	очертание лица	Овальное	квадратное

Для конкретного лица  $A$  эксперт, исходя из приведенной шкалы, задает  $\mu_A(x) \in [0, 1]$ , формируя векторную функцию принадлежности  $\{\mu_A(x_1), \mu_A(x_2), \dots, \mu_A(x_9)\}$ .

При прямых методах используются также групповые прямые методы, когда, например, группе экспертов предъявляют конкретное лицо и каждый должен дать один из двух ответов: «этот человек лысый» или «этот человек не лысый», тогда количество утвердительных ответов, деленное на общее число экспертов, дает значение  $\mu_{\text{лысый}}$  (данного лица). (В этом примере можно действовать через функцию совместимости, но тогда придется считать число волосинок на голове у каждого из предъявленных эксперту лиц.)

*Косвенные* методы определения значений функции принадлежности используются в случаях, когда нет элементарных измеримых свойств, через которые определяется интересующее нас нечеткое множество [36]. Как правило, это методы попарных сравнений. Если бы значения функций

принадлежности были нам известны, например,  $\mu_A(x_i) = \omega_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , то попарные сравнения можно представить матрицей отношений  $A = \{a_{ij}\}$ , где  $a_{ij} = w_j/w_i$  (операция деления).

На практике эксперт сам формирует матрицу  $A$ , при этом предполагается, что диагональные элементы равны 1, а для элементов симметричных относительно диагонали  $a_{ij}=1/a_{ji}$ , т.е. если один элемент оценивается в  $\alpha$  раз сильнее, чем другой, то этот последний должен быть в  $1/\alpha$  раз сильнее, чем первый. В общем случае задача сводится к поиску вектора  $w$ , удовлетворяющего уравнению вида  $Aw = \lambda_{\max} w$ , где  $\lambda_{\max}$  — наибольшее собственное значение матрицы  $A$ . Поскольку матрица  $A$  положительна по построению, решение данной задачи существует и является положительным.

Можно отметить еще два подхода [36]:

- *использование типовых форм* кривых для задания функций принадлежности с уточнением их параметров в соответствии с данными эксперимента;
- *использование относительных частот* по данным эксперимента в качестве значений принадлежности.

## 2.5 База нечетких правил

Для создания базы нечетких правил должны соблюдаться следующие условия [36, 38]: существует хотя бы одно правило для каждого лингвистического термина выходной переменной; для любого термина входной переменной имеется хотя бы одно правило, в котором он используется в качестве предпосылки (левая часть правила). В противном случае имеет место неполная база нечетких правил.

Для нахождения верного пути и для проведения операции нечеткого логического вывода создается база нечетких правил, содержащая нечеткие высказывания в форме «IF-THEN» и ФП для соответствующих лингвистических термов. Совокупность таких правил описывает стратегию управления, применяемую в данной задаче. Большинство нечетких систем используют продукционные правила для описания зависимостей между лингвистическими переменными. Типичное продукционное правило состоит из антецедента (часть IF ...) и консеквента (часть THEN...). Антецедент может содержать более одной посылки. В этом случае они объединяются посредством

логических связок AND или OR. Общий вид [32]:  
 $IF (v_1 \in A_{\mu 1}) AND (v_2 \in A_{\mu 2}) AND \dots AND (v_k \in A_{\mu k})$   
 $THEN y = \eta_i(v), i = 1, \dots, N$ , где  $A_{\mu i}$  - нечеткое подмножество, то есть нечеткий интервал, для переменной  $v_j$  с ФП  $\mu_i(v)$ ;  $y = \eta_i(v)$  - функция, определяющая локальное решение модели от набора  $v = (v_1, \dots, v_k)$ ,  $N$  - число правил (число интервалов), который должен соответствовать количеству термов.

**Пример** базы нечетких правил для одной переменной.

Вид функции  $\eta_i(v)$  с ее коэффициентами для каждого терма отдельно находится на основе экспериментальных данных с помощью регрессионного моделирования, например  $\eta_i(v) = 5v^2 + 6v + 2$  квадратичное уравнение с параметрами 5, 6 и 2, а также может определяться методами факторного анализа, многопараметрической оптимизации на основе логического вывода. Тогда конечная формула модели будет выглядеть так [32]:

$$y = \sum_{i=1}^N \mu_i(v) \cdot \eta_i(v) \quad (2.6)$$

## 2.6 Нечеткие выводы

Все системы с нечеткой логикой функционируют по одному принципу [34, 36]: ввод данных, например показания измерительных приборов: фаззифицируются (превращаются в нечеткий формат), обрабатываются, дефаззифицируются и далее подаются на выход, например на исполнительные устройства в виде обычных сигналов.

Общая структура принципа работы системы с нечеткой логики показана на рисунке 2.4. Она содержит: блок фаззификации; базу знаний; блок решений; блок дефаззификации. Блок фаззификации преобразует четкие величины, измеренные на выходе объекта управления (ОУ), в нечеткие величины, которые описаны лингвистическими переменными в базе знаний. Блок решений использует нечеткие условные (IF - THEN) правила, заложенные в базу знаний, для преобразования нечетких входных данных в необходимые управляющие влияния, которые также носят нечеткий характер. Блок дефаззификации превращает нечеткие

данные с выхода блока решений в четкую величину, которая используется для управления объектом.

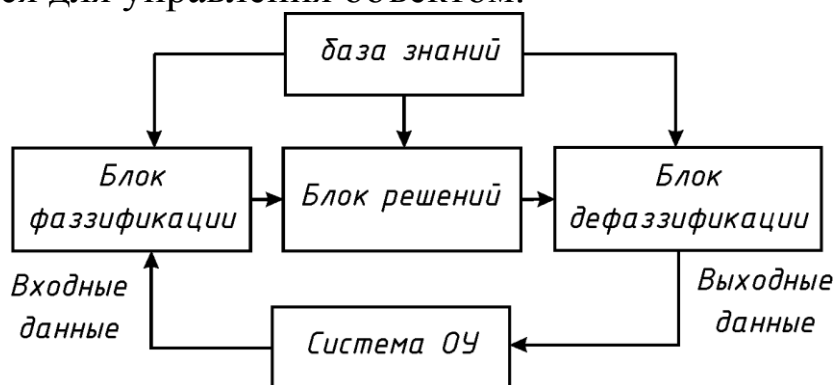


Рисунок 2.4 – Структура принципа работы системы объекта управления (ОУ) с нечеткой логикой

Этап фаззификации по формализации задачи в терминах нечеткой логики для одной переменной состоит из следующих шагов [38]:

1. Для каждого терма взятой лингвистической переменной находится числовое значение или диапазон значений, наилучшим образом характеризующих данный терм. Так как это значение или значения являются «прототипом» нашего терма, то для них выбирается единичное значение функции принадлежности.

2. Далее определяется значение параметра с принадлежностью «0» к данному терму. Это значение может быть выбрано как значение с принадлежностью «1» к другому терму из числа определенных ранее.

3. После определения экстремальных значений определяются ФП, например S- или Z-функции, для промежуточных значений выбираются П- или Л-функции.

Общий логический вывод для нескольких переменных осуществляется за следующие четыре этапа.

1) Нечеткость (введение нечеткости, фазификация, fuzzification). Функции принадлежности, определенные на входных переменных применяются к их фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила.

2) Логический вывод. Вычисленное значение истинности для предпосылок каждого правила применяется к заключениям каждого правила. Это приводит к одному нечеткому подмножеству, которое будет назначено каждой переменной вывода для каждого правила. В качестве правил логического вывода обычно используются только операции  $\min$  (МИНИМУМ) или  $\text{prod}$  (УМНОЖЕНИЕ). В логическом выводе МИНИМУМА функция принадлежности вывода «отсекается» по высоте, соответствующей вычисленной степени истинности предпосылки правила (нечеткая логика «И»). В логическом выводе УМНОЖЕНИЯ функция принадлежности вывода масштабируется при помощи вычисленной степени истинности предпосылки правила.

3) Композиция. Все нечеткие подмножества, назначенные к каждой переменной вывода (во всех правилах), объединяются вместе, чтобы формировать одно нечеткое подмножество для каждой переменной вывода. При подобном объединении обычно используются операции  $\max$  (МАКСИМУМ) или  $\text{sum}$  (СУММА). При композиции МАКСИМУМА комбинированный вывод нечеткого подмножества конструируется как поточечный максимум по всем нечетким подмножествам (нечеткая логика «ИЛИ»). При композиции СУММЫ комбинированный вывод нечеткого подмножества конструируется как поточечная сумма по всем нечетким подмножествам, назначенным переменной вывода правилами логического вывода.

4) В заключение (дополнительно) – *приведение к четкости* (дефазификация, defuzzification), которое используется, когда полезно преобразовать нечеткий набор выводов в четкое число. Имеется большое количество методов приведения к четкости, некоторые из которых рассмотрены ниже.

**Пример** [36]. Пусть некоторая система описывается следующими нечеткими правилами:

$P_1$ : если  $x$  есть  $A$ , тогда  $w$  есть  $D$ ,

$P_2$ : если  $y$  есть  $B$ , тогда  $w$  есть  $E$ ,

$P_3$ : если  $z$  есть  $C$ , тогда  $w$  есть  $F$ , где  $x$ ,  $y$  и  $z$  – имена входных переменных,  $w$  – имя переменной вывода, а  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$  – заданные функции принадлежности (треугольной формы).

Процедура получения логического вывода иллюстрируется рис. 2.5. Предполагается, что входные переменные приняли некоторые конкретные (четкие) значения –  $x_0$ ,  $y_0$  и  $z_0$ .

В соответствии с приведенными этапами, на этапе 1 для данных значений и исходя из функций принадлежности А, В, С, находятся степени истинности  $a(x_0)$ ,  $a(y_0)$  и  $a(z_0)$  для предпосылок каждого из трех приведенных правил (см. рис. 2.5).

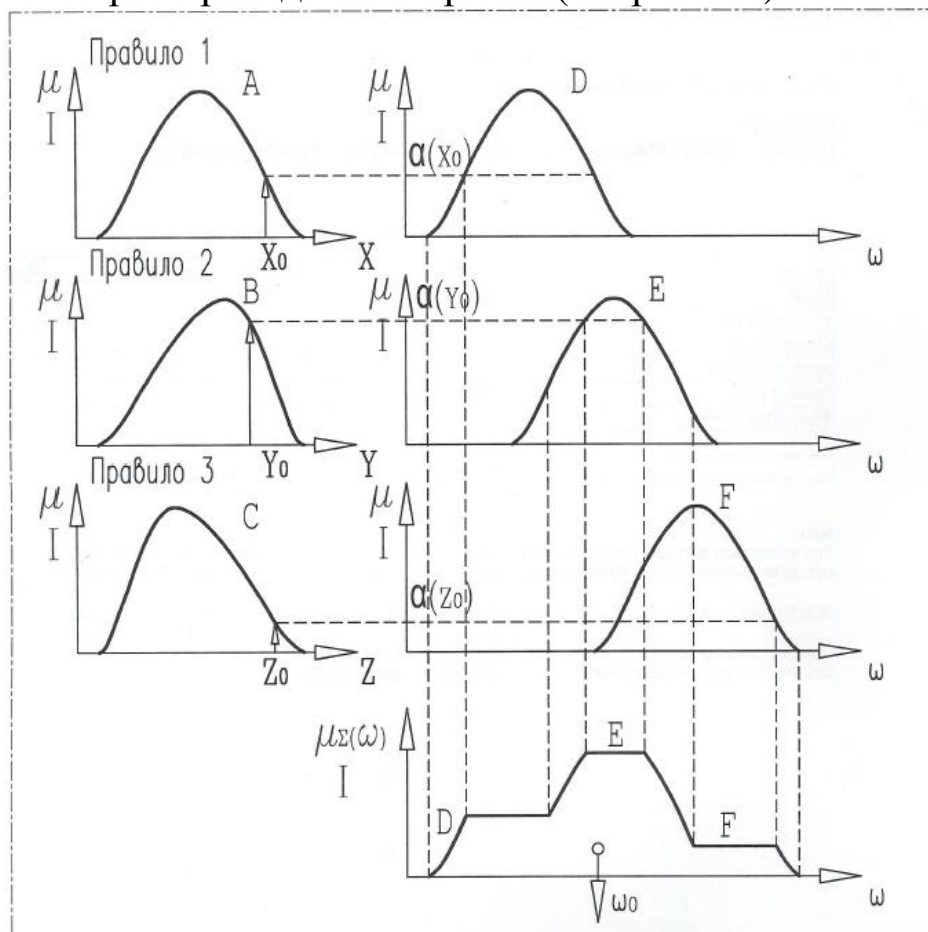


Рисунок 2.5 – Иллюстрация композиции и приведение к четкости, то есть получение конкретной величины.

На этапе 2 происходит «отсекание» функций принадлежности заключений правил (т.е. D, E, F) на уровнях  $a(x_0)$ ,  $a(y_0)$  и  $a(z_0)$ .

На этапе 3 рассматриваются усеченные на втором этапе функции принадлежности и производится их объединение с использованием операции  $\max$ , в результате чего получается комбинированное нечеткое подмножество, описываемое функцией принадлежности  $\mu_{\Sigma}(w)$  и соответствующее логическому выводу для выходной переменной  $w$ .

Наконец, на 4-м этапе – при необходимости – находится четкое значение выходной переменной, например, с применением центроидного метода [36]: четкое значение выходной переменной определяется как центр тяжести для

$$\text{кривой } \mu_{\Sigma}(w) \text{ т.е. } w_0 = \frac{\int_{\Omega} w \mu_{\Sigma}(w) dw}{\int_{\Omega} \mu_{\Sigma}(w) dw}$$

Таким образом, математический аппарат нечеткой логики используется при нечетких определениях. Это позволяет строить модели, которые наиболее адекватно отражают различные аспекты неопределенности при расчете сложных задач.

**Алгоритм Мамдани (Mamdani)** [36] является одним из первых, который нашел применение в системах нечеткого вывода. Он был предложен в 1975 г. английским математиком Е. Мамдани (Ebrahim Mamdani) в качестве метода для управления паровым двигателем. По своей сути этот алгоритм порождает рассмотренные выше этапы, поскольку в наибольшей степени соответствует их параметрам. Формально *алгоритм Мамдани* может быть определен следующим образом:

а) находятся степени истинности для предпосылок каждого правила:  $A_1(x_0)$ ,  $A_2(x_0)$ ,  $B_1(y_0)$ ,  $B_2(y_0)$

б) Нечеткий вывод: находятся уровни «отсечения» для предпосылок каждого из правил (с использованием операции МИНИМУМ)

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0),$$

где через « $\wedge$ » обозначена операция логического минимума (min), затем находятся «усеченные» функции принадлежности

$$C'_1(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)), C'_2(z) = (\alpha_2 \wedge C_2(z))$$

в) с использование операции МАКСИМУМ (max, далее обозначаемой как « $\vee$ ») производится объединение найденных усеченных функций, что приводит к получению итогового нечеткого подмножества для переменной выхода с функцией принадлежности

$$\mu_{\Sigma}(z) = C(z) = C'_1(z) \vee C'_2(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(z))$$

г) Наконец, приведение к четкости (для нахождения  $z_0$ ) проводится, например, центроидным методом.

## 2.7 Примеры нечеткой логики

**Пример 1** [35]. Нечеткое множество «Оптимальный возраст работника» полностью определяется заданием функции принадлежности  $\mu_A(x)$ : ее область определения –  $E = [20, 70]$ , область значений – отрезок  $[0,1]$ . Полученная на основе опроса ряда экспертов функция принадлежности представлена на рисунке 2.6.

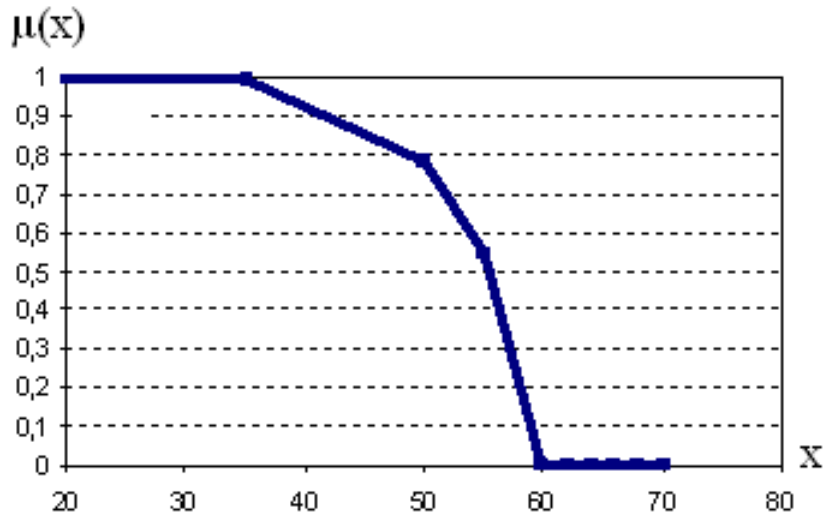


Рисунок 2.6 – Функция принадлежности  $\mu_A(x)$

Возраст от 20 до 35 оценивается экспертами как бесспорно оптимальный, в диапазоне от 35 до 60 эксперты проявляют неуверенность, от 60 до 70 – не оптимальный.

**Пример 2** для одной переменной. Лингвистическая переменная ( $\beta$ , T, X, G, M), где  $\beta$  – влажность грунта; T – {«сухой», «влажный»}; X –  $[0,100]$ ; P – процедура задания на  $X=[0, 100]$  нечетких подмножеств  $A_1 =$  «сухой»,  $A_2 =$  «влажный» (рис. 2.7).



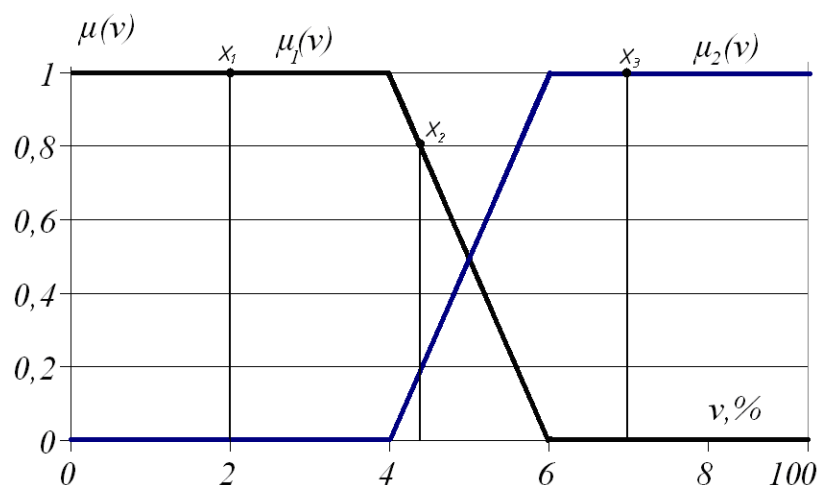


Рисунок 2.7 – Функции принадлежности  $\mu_1(v)$  и  $\mu_2(v)$ .

Первому терму «сухой» принадлежит интервал от 0 до 4% с функцией принадлежности  $\mu_1(v)$ , второму – от 6 до 100% с  $\mu_2(v)$ , интервал переключения – от 4 до 6%. Функции принадлежности представлены на рисунке 2.7 и имеют вид:

$$\mu_1(v) = \begin{cases} 1, & v < 4, \\ \frac{6-v}{2}, & 4 < v < 6, \\ 0, & v > 6 \end{cases} \quad \mu_2(v) = \begin{cases} 0, & v < 4, \\ 1 - \frac{6-v}{2}, & 4 < v < 6, \\ 1, & v > 6 \end{cases} \quad (2.7)$$

Регрессионные уравнения  $\eta_1(v) = 2v^2 + 2$ ,  $\eta_2(v) = 12v + 3$ , тогда конечная формула модели будет выглядеть так:

$$y = (2v^2 + 2)\mu_1(v) + (12v + 3)\mu_2(v) \quad (2.8)$$

Если  $v=2\%$  (в точке  $x_1$  рис.2.7 и рис.2.8), то влажность находится в первом интервале и соответствует терму «сухой», где  $\mu_1(v)=1$  и  $\mu_2(v)=0$ , тогда  $y=(2 \cdot 2^2 + 2) \cdot 1 + (12 \cdot 2 + 3) \cdot 0 = 10$ . Если  $v=4,4\%$  (точка  $x_2$ ), то влажность находится в интервале переключения, где  $\mu_1(v) = 0,8$  и  $\mu_2(v) = 0,2$ , тогда  $y = (2 \cdot 4,4^2 + 2) \cdot 0,8 + (12 \cdot 4,4 + 3) \cdot 0,2 = 43,7$ , если  $v = 7\%$  (точка  $x_3$ ), то  $y = (2 \cdot 7^2 + 2) \cdot 0 + (12 \cdot 7 + 3) \cdot 1 = 87$ .

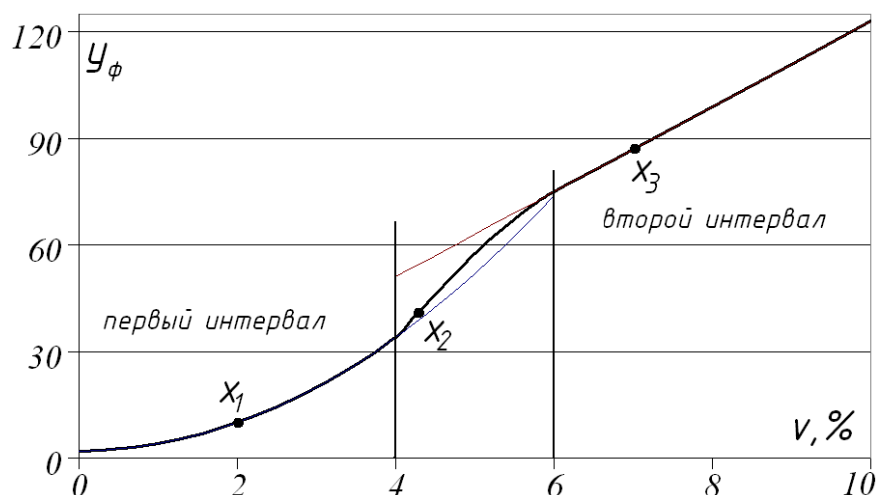


Рисунок 2.8 – График модели  $y$ .

**Пример 3** алгоритм нечеткого вывода для нескольких переменных (цитирован из [35]). Пусть у нас есть некоторая система, например реактор, описываемая тремя параметрами: температура, давление и расход рабочего вещества. Все показатели измеримы и множество возможных значений известно. Так же из опыта работы с системой известны некоторые правила, связывающие значения этих параметров. Предположим, что сломался датчик, измеряющий значение одного из параметров системы, но знать его значение хотя бы приблизительно необходимо. Тогда встаёт задача об отыскании этого неизвестного значения (пусть это будет давление) при известных значениях двух других параметров (температуры и расхода) и связи этих величин в виде следующих правил:

- Если «Температура низкая» и «Расход малый», то «Давление низкое».
- Если «Температура средняя», то «Давление среднее».
- Если «Температура высокая» или «Расход большой», то «Давление высокое».

В нашем случае Температура, Давление и Расход – лингвистические переменные. Опишем каждую из них.

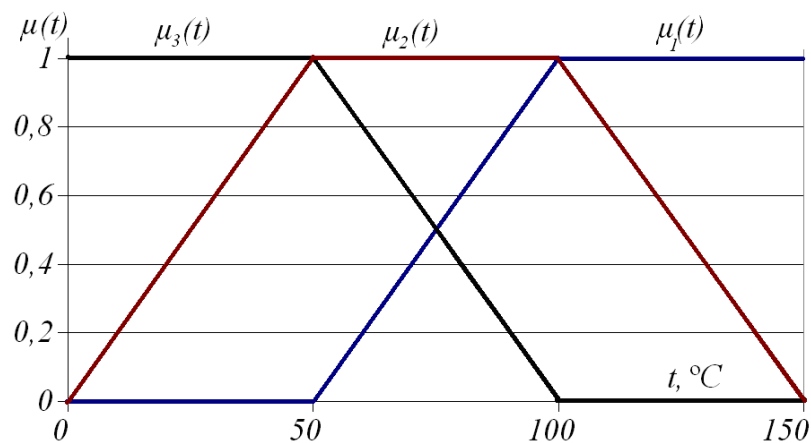


Рисунок 2.9 – Функции принадлежности  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и  $\mu_3$ .

Температура. Множество возможных значений – отрезок  $[0,150]$ . Начальное множество термов: «Высокая» с функцией принадлежности  $\mu_1(t)$ , «Средняя» с  $\mu_2(t)$ , «Низкая» с  $\mu_3(t)$ , которые представлены на рисунке 2.9.

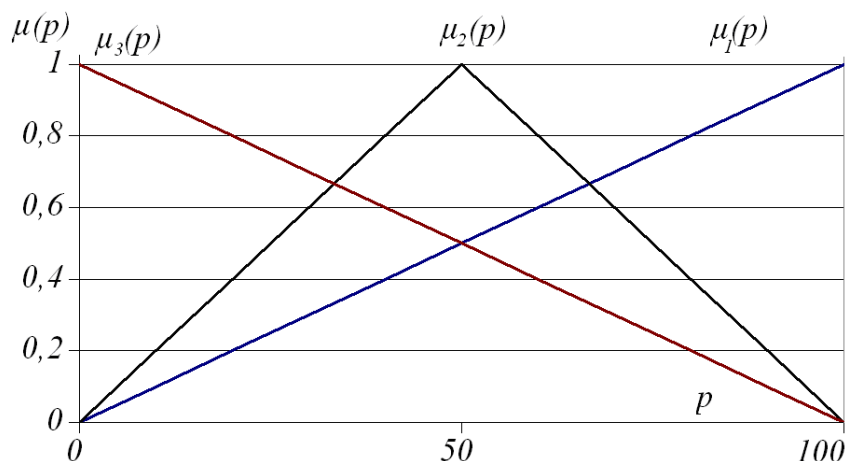


Рисунок 2.10 – Функции принадлежности  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и  $\mu_3$ .

Давление. Отрезок  $[0,100]$ . Начальное множество термов: «Высокое», «Среднее», «Низкое» с функциями принадлежности, представленными на рисунке 2.10  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и  $\mu_3$  соответственно:

Расход. Отрезок  $[0,8]$ . Начальное множество термов: «Малый», «Средний», «Большой». Функции принадлежности термов представлены на рис. 2.11.

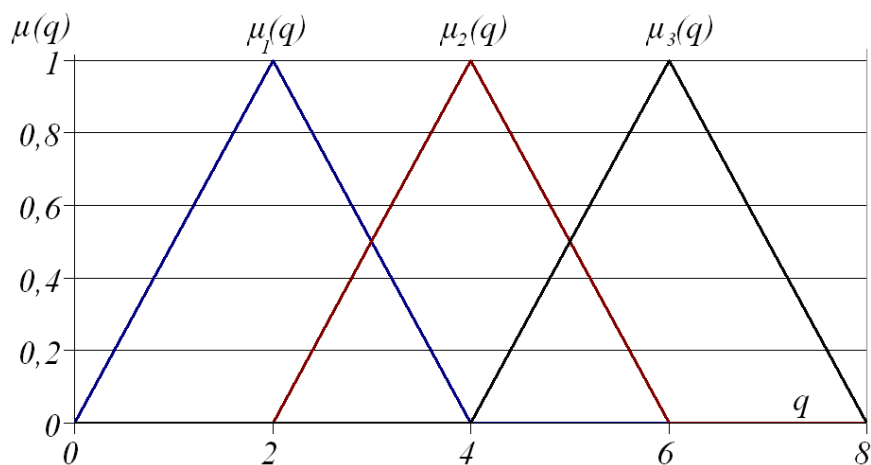


Рисунок 2.11 – Функции принадлежности  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и  $\mu_3$ .

Пусть известны значения Температура 85 и Расход 3,5. Произведём расчёт значения давления.

Последовательно рассмотрим этапы нечеткого вывода:

Сначала по заданным значениям входных параметров найдём степени уверенности простейших утверждений вида «Лингв. переменная А есть Терм Лингв. переменной А». Этот этап называется фаззификацией, т.е. переход от заданных чётких значений к степеням уверенности. Для этого по рисунку 2.9 при  $t=85^\circ\text{C}$  получаем следующие степени уверенности:

- Температура Высокая - 0,7
- Температура Средняя - 1
- Температура Низкая - 0,3

По рисунку 2.11 при расходе равном 3,5 получаем:

- Расход Большой - 0
- Расход Средний - 0,75
- Расход Малый - 0,25

Затем вычислим степени уверенности посылок правил:

- Температура низкая и Расход малый:  $\min(\text{Темп. Низкая, Расход Малый}) = \min(0,3, 0,25)=0,25$
- Температура Средняя : 1
- Температура Высокая или Расход Большой:  $\max(\text{Темп. Высокая, Расход Большой}) = \max(0,7,0) = 0,7$

Следует отметить так же тот факт, что с помощью преобразований нечётких множеств любое правило содержащее в левой части как конъюнкции, так и дизъюнкции можно привести к системе правил, в левой части каждого будут

либо только конъюнкции, либо только дизъюнкции. Таким образом, не уменьшая общности, можно рассматривать правила, содержащие в левой части либо только конъюнкции, либо только дизъюнкции.

Каждое из правил представляет из себя нечёткую импликацию. Степень уверенности посылки мы вычислили, а степень уверенности заключения задаётся функцией принадлежности соответствующего терма. Поэтому, используя один из способов построения нечёткой импликации, мы получим новую нечёткую переменную, соответствующую степени уверенности о значении выходного результата при применении к заданным входным соответствующего правила. Механизм получения следующий: на рисунке 2.10 с изображением функций принадлежности переменной «Давление», следуя полученным значениям из правил при «Низкой температуре» = 0,25, при «Высокой» = 0,7 и при «Средней» = 1, используя определение нечёткой импликации как минимума левой и правой частей, отсекаем верхнюю часть графиков для значений давления «Низкое» на уровне 0,25 и «Высокое» на - уровне 0,7. Функция принадлежности «Среднее» остается по второму правилу неизменной. В результате получается процесс, изображенный на рисунке 2.12:

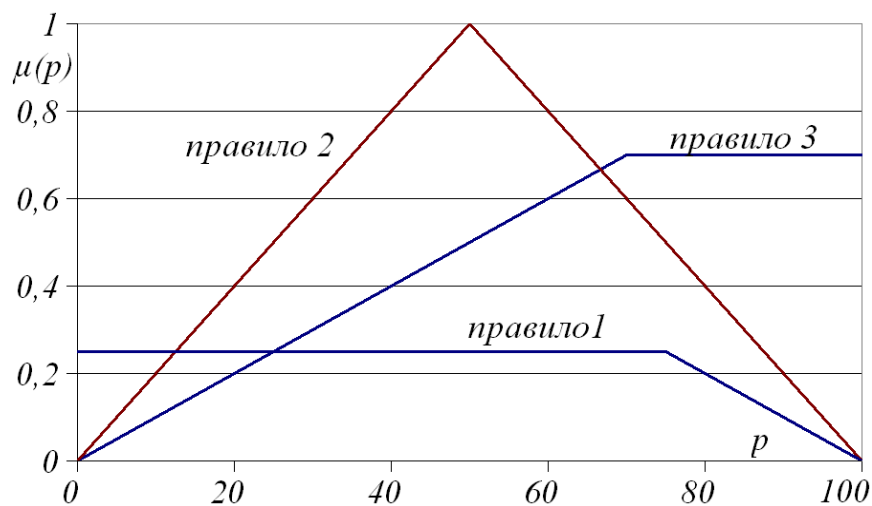


Рисунок 2.12 – Совокупность правил для определения давления.

Теперь необходимо объединить результаты применения всех правил. Этот этап называется аккумуляцией. Один из основных способов аккумуляции – построение максимума полученных функций принадлежности. Получаем результат, представленный на рис. 2.13.

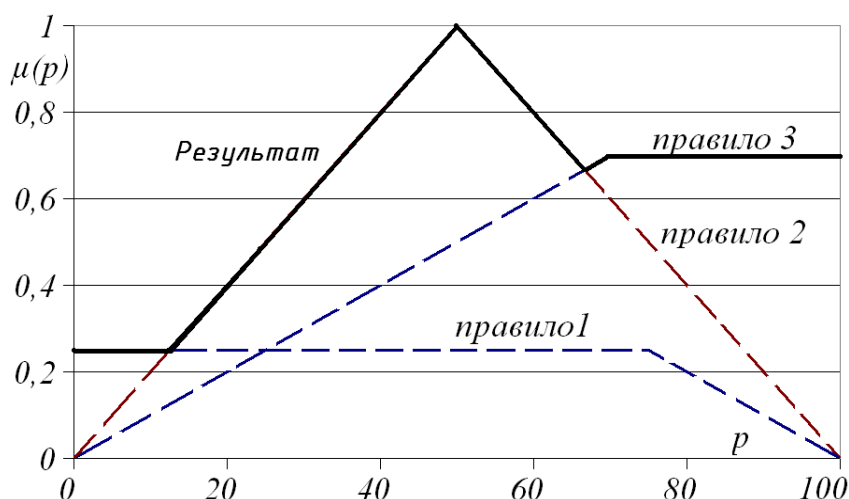


Рисунок 2.13 – Результат для определения давления.

Полученную функцию принадлежности уже можно считать результатом. Это новый терм выходной переменной «Давление». Его функция принадлежности говорит о степени уверенности в значении давления при заданных значениях входных параметров и правилах, определяющих соотношение входных и выходных переменных. Но для практики необходимо конкретное числовое значение. Для его получения используется процедура, называемая дефаззификацией, позволяющая получить конкретное значение из множества значений по заданной на нём функции принадлежности.

Существует множество методов дефаззификации, но в рассматриваемом случае достаточно метода первого максимума. Применяя его к полученной функции принадлежности, получаем, что значение давления равно 50.

**Пример 4** (цитирован из [34]). Пример получения значения вероятности дорожно-транспортного происшествия, совершаемого водителем, при указании его возраста. По нечеткой базе знаний требуется выполнить нечеткий логический вывод при значениях входной переменной  $x=28$ (лет) и  $x$ =«старый».

Выполнение нечеткого логического вывода при значениях входной переменной  $x=28$  показано на рис.2.14, а  $x=$ «средний» - на рис.2.15. Операция агрегирования выполняется нахождением максимума, а дефаззификации - по методу центра тяжести.

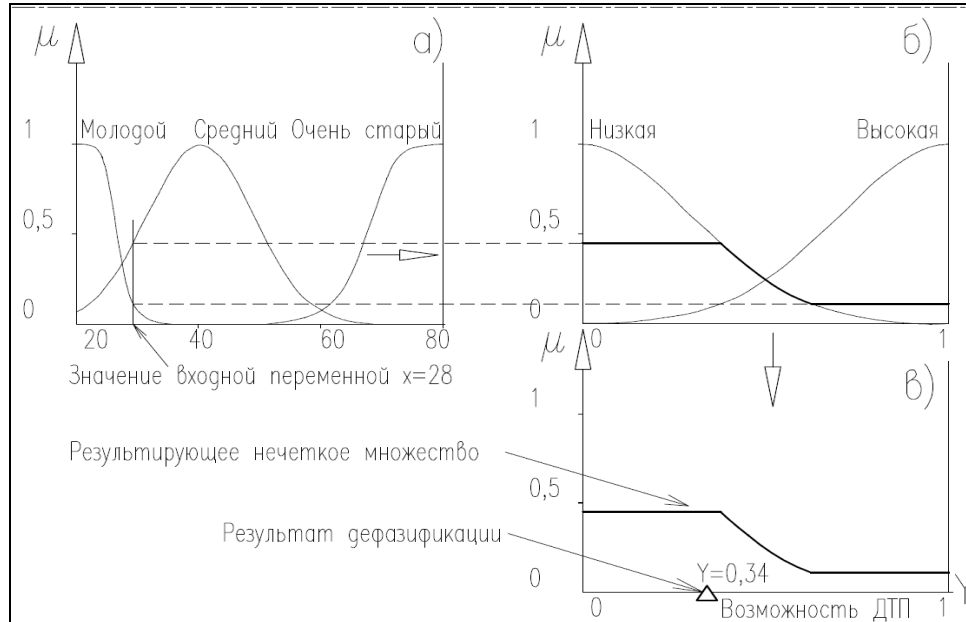


Рисунок 2.14 – Нечеткий логический вывод Мамдани при четком значении входной переменной  $x=28$ .

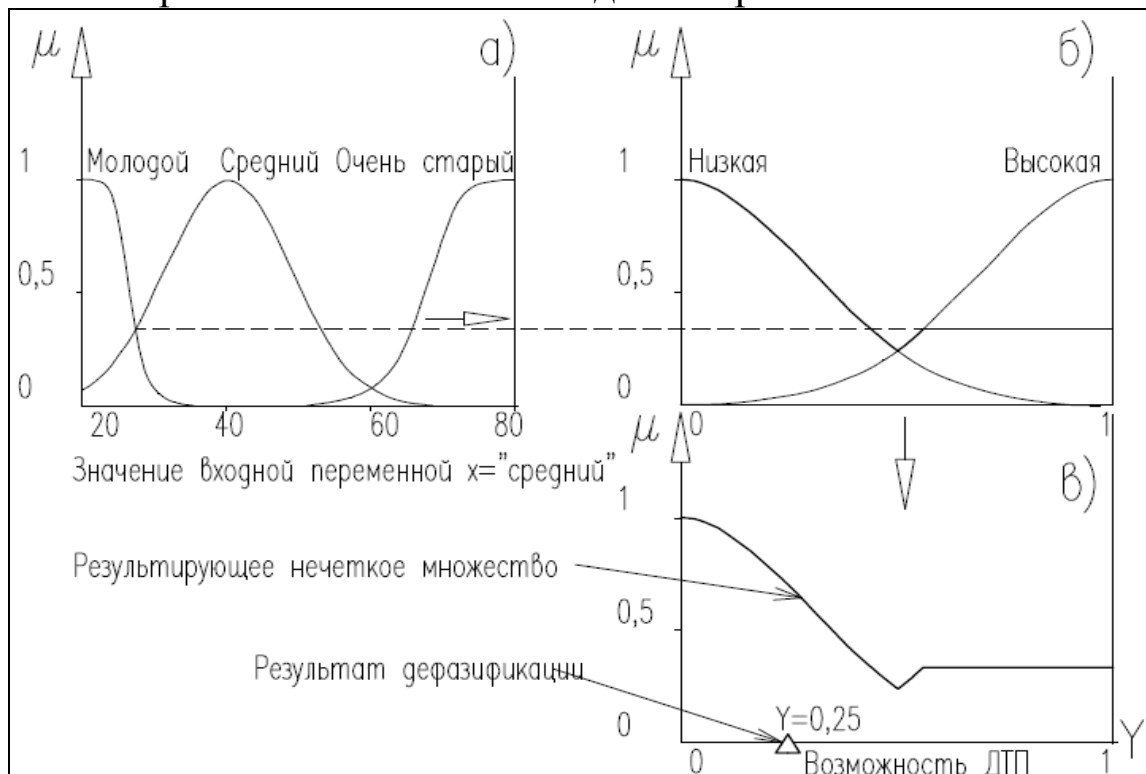


Рисунок 2.15 – Нечеткий логический вывод Мамдани при нечетком значении входной переменной  $x=$  «средний»

Поясним механизм. Статистика утверждает, что молодые и старые водители с большой степенью вероятности совершают дорожно-транспортные происшествия. Первые ввиду неопытности и невнимательности, вторые - из-за отсутствия быстроты реакции. Поэтому при построении функций принадлежности для этих двух категорий соответствует одна функция с характеристикой «Высокая вероятность». Водители среднего возраста реже совершают ДТП ввиду отсутствия недостатков молодых и старых водителей. Поэтому данному возрасту соответствует функция принадлежности с характеристикой «Низкая вероятность». Графики функции принадлежности вероятности ДТП изображены с литерой (б), а графики функции принадлежности возрасту - литерой (а) на рисунках 2.14 и 2.15.

Операция агрегирования выполняется перенесением точек пересечения значения возраста с функциями принадлежности (рис. 2.14, а и 2.15, а) и сопоставлением полученных значений функций принадлежности вероятности ДТП (рис. 2.14, б 2.15, б). Результат изображен на рисунках (рис. 2.14, в 2.15, в).

Используя представленную методику, можно построить функцию, связывающую нечеткую переменную «возраст водителя» с вероятностью ДТП на всем диапазоне возрастов.

**Пример 5. Расчет режима при нечетко-определенной информации** (цитирован из [37]).

Получение точных данных о нагрузках узлов, которые в основном формируют параметры режимов электрических систем, проблематично получить из-за отсутствия средств измерения и передачи информации о нагрузках электрических сетей. Это решается за счет построения функции принадлежности нагрузок узлов, которые строятся путем контрольных измерений и с использованием экспертных оценок. Нечеткими могут быть как активные, так и реактивные мощности узлов. Наиболее простым представлением нагрузок является нечеткий интервал.

Функция принадлежности для нагрузок узлов имеет вид в соответствии с выражением



$$\mu(P_i) = \begin{cases} 0, \text{ если } P_i \leq P_i^{I-} \\ 1 + \frac{P_i - P_i^{I-}}{P_i^{I-} - P_i^{III-}}, \text{ если } P_i^{I-} < P_i < P_i^{III-} \\ 1, \text{ если } P_i^{III-} < P_i < P_i^{III+} \\ 0, \text{ если } P_i \geq P_i^{I+} \end{cases} \quad (2.9)$$

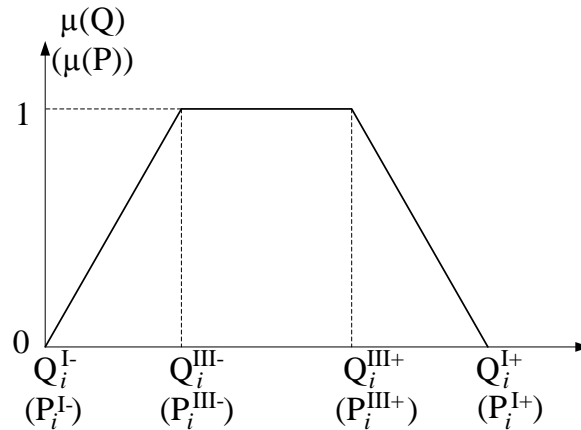


Рисунок 2.16 – Общий вид функций принадлежности нагрузок узлов

Функцию принадлежности каждой переменной можно охарактеризовать четырьмя числами и представить как (рис. 2.16):

$$\mu(P_i) = [P_i^{I-}; P_i^{III-}; P_i^{III+}; P_i^{I+}], \quad (2.10)$$

$$\mu(Q_i) = [Q_i^{I-}; Q_i^{III-}; Q_i^{III+}; Q_i^{I+}] \quad (2.11)$$

Если принять, что значения  $P_i^{III-}$  и  $P_i^{III+}$  совпадают, тогда функции принадлежности нагрузок примет вид:

$$\mu(P_i) = \begin{cases} 0, \text{ если } P_i \leq P_i^{I-} \\ 1 + \frac{P_i - P_i^{I-}}{P_i^{I-} - P_i^{III}}, \text{ если } P_i^{I-} < P_i < P_i^{III} \\ 1, \text{ если } P_i^{III-} < P_i < P_i^{III} \\ 1 + \frac{P_i^{III} - P_i}{P_i^{I+} - P_i^{III}}, \text{ если } P_i^{III} < P_i < P_i^{I+} \\ 0, \text{ если } P_i \geq P_i^{I+} \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\mu(Q_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } Q_i \leq Q_i^{I-} \\ 1 + \frac{Q_i - Q_i^{I-}}{Q_i^{I-} - Q_i^{III}}, & \text{если } Q_i^{I-} < Q_i < Q_i^{III} \\ 1, & \text{если } Q_i^{III} < Q_i < Q_i^{III} \\ 1 + \frac{Q_i^{III} - Q_i}{Q_i^{I+} - Q_i^{III}}, & \text{если } Q_i^{III} < Q_i < Q_i^{I+} \\ 0, & \text{если } Q_i \geq Q_i^{I+} \end{cases} \quad (2.13)$$

Тогда функции принадлежности можно представить тремя числами (рис. 2.17):

$$\mu(P_i) = [P_i^{I-}; P_i^{III}; P_i^{I+}],$$

$$\mu(Q_i) = [Q_i^{I-}; Q_i^{III}; Q_i^{I+}]$$

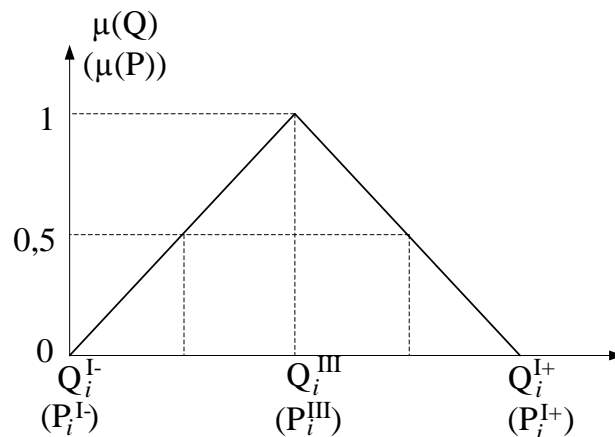


Рисунок 2.17 – Функции принадлежности нагрузок

Для преобразования нечетко-определенных параметров применяется математический аппарат теории нечетких множеств и лингвистической переменной. Его особенность заключается в том, что он основан на минимаксных преобразованиях и позволяет с наименьшими искажениями и потерей информации передать неопределенность входных переменных результату расчета и тем самым обеспечить наиболее реальное представление о выходных параметрах.

Согласование носителей нечетких переменных осуществляется на основе законов электрических цепей. Субъективные данные объективизируются и теряют на время преобразования свой лингвистический смысл. Для восстановления лингвистического

смысла нечеткой переменной выполняется лингвистическая аппроксимация.

В качестве независимых примем вектор мощностей нагрузок. Нечеткий характер информации о нагрузках электрической сети обуславливает и нечеткость в напряжениях узлов. Уравнения, связывающие нечеткие параметры режима, называются нечеткими уравнениями установившегося режима

Общий алгоритм расчета по этому методу:

1. Определение центральных значений напряжений узлов схемы. Производится путем расчета установившегося режима, когда нагрузки в узлах заданы их центральными значениями.

2. Статистическое испытание вектора мощностей нагрузок. Целесообразно испытания организовать с помощью датчика случайных чисел, распределенных по закону равномерной плотности. При этом обеспечивается равномерность выбора элементов из множества состояния вектора мощностей нагрузок.

3. Расчет режима и определение напряжений в узлах.

4. Расчет степеней принадлежности для напряжений узлов схемы.

5. Оценка необходимости продолжения испытаний

Основные недостатки изложенного подхода связаны с необходимостью обращения матрицы Якоби, а также с ограниченными возможностями применения сокращенных алгоритмов.

## **2.8 Вопросы для проверки знаний**

1. В чем отличие четкого множества от нечеткого?

2. Перечислите виды функций принадлежности, и в каких случаях они применяются.

3. В чем отличие нечеткой переменной от лингвистической?

4. Приведите примеры использования нечеткой логики в электроэнергетике.

5. Какие алгоритмы вывода вы знаете? Перечислите их достоинства и недостатки.

6. Основные понятия нечеткой логики.

7. Основные понятия нечеткого множества.

### 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

#### 3.1 Программы для расчета параметров заземлителей

Для расчета параметров ЗУ в последнее время используются программы, в которых  $\rho$  определяется следующим образом. Программа «ОРУ-Проект» (НПФ ЭЛНАП, Москва, с сертификатом соответствия №06 0001.0215) требует ввода измеренных значений  $\rho$  и с учетом климатической зоны и выбором влажности из предлагаемого списка понятий, выдает скорректированное значение удельного электрического сопротивления. Например, для песка (измеренное значение  $\rho$  – 700 Ом·м верхнего и 200 Ом·м нижнего слоя) при выборе первой климатической зоны и средней влажности скорректированное  $\rho=1184$  Ом·м. Программа «Электрик 6.1» (Москва, используется в Павлодарском «Технотрейде», занимающимся телекоммуникационным заземлением) позволяет выбирать вид грунта с соответствующим ему одним значением  $\rho$ , например для песка при залегании грунтовых вод глубже 5м  $\rho=1000$  Ом·м или при залегании грунтовых вод до 5м  $\rho=500$  Ом·м. Подпрограмма «Zazemlitel 1.0» в составе программы **РОС 1.4** (используется в Энергопроект-Севере, ОАО НМУ-2 "Сибэлектромонтаж", ЗАО "НПК Уралпромэкология" и других организациях РФ, Украины, Казахстана, а также частные лица) предоставляет список грунтов с определенным удельным сопротивлением, например для песка слегка влажного  $\rho=700$  Ом·м, сухого  $\rho=2000$  Ом·м. Если же взять программу «Заземлитель 1.0» (Вероев ЗУ, Украина, Одесса, используется в Харьковском политехническом институте, в Барнаульском проектном институте), то при выборе: типа грунта с определенным диапазоном изменения  $\rho$ , климатической зоны и влажности грунта во время измерения  $\rho$  либо температуры грунта с использованием (1.14), вычисляется поправочный коэффициент. Результирующее значение  $\rho$  равняется произведению этого коэффициента на среднее значение  $\rho$  из указанного диапазона. Например, для песка диапазон

изменения  $\rho=400\div 1000$  Ом·м (среднее 700 Ом·м), расчетное  $\rho=1190$  Ом·м при поправочном коэффициенте  $k=1,7$  с первой климатической зоной и средней влажностью измерения. В литературе [9] для сухого песка  $\rho=1500\div 4200$  Ом·м, для сильно влажного  $\rho=10\div 60$  Ом·м, а по экспериментальным данным  $\rho$  сильно увлажненного песка меняется в пределах  $10\div 5000$  Ом·м только в зависимости от изменения температуры от  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $-20^{\circ}\text{C}$ . В результате основным недостатком всех выше перечисленных программ является то, что  $\rho$  в них определяют с учетом поправочного коэффициента либо выбирают среднее его значение. Это приводит к погрешностям его расчета.

Таким образом, возникает необходимость более точного определения  $\rho$  грунта с учетом его температуры и влажности для достаточно точного расчета сопротивления заземлителей.

### **3.2. Построение зависимостей удельного электрического сопротивления грунта от влажности.**

Опираясь на приведенные в литературе [9] модели удельного электрического сопротивления от влажности для некоторых грунтов (песок, суглинок, щебень), где  $\rho$  задается в виде предельных значений для характеристик влажности типа «сильно увлажненный», «влажный», «сухой» и т. п. в данной работе предпринята попытка разработать методику построения модели для определения зависимости удельного электрического сопротивления от влажности, пригодную для любого типа грунта.

Определение удельного сопротивления грунта в зависимости от влажности решено было проводить с помощью регрессионного моделирования с применением теории нечетких множеств.

Для построения модели определения удельного электрического сопротивления грунта разработана лабораторная установка и проведены эксперименты при изменении влажности приблизительно от 0% до насыщения грунта водой при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  (выбор данного значения температуры объясняется необходимостью подстановки  $\rho_{20}$  в известную [9] формулу (1.14) для вычисления удельного

электрического сопротивления при любой положительной температуре).

Установка [30] изготовлена из органического стекла в виде лабиринта для увеличения длины проводящего слоя. Electroды выполнены из медной пластины, размеры которых равны 44x40 мм, длина проводящего слоя грунта 1.65 м, сечение слоя равно площади электродов. Общий объем размещаемого в установке грунта  $0.003\text{ м}^3$ . Использовались наиболее часто встречающиеся при организации устройств заземления в Казахстане виды грунта: песок, супесь, глина. Грунт с определенной влажностью  $\nu$  помещался в установку, которая подключалась к источнику переменного тока с частотой 50 Гц. Температура грунта измерялась тремя термометрами. Ввиду незначительной толщины грунта разность температур в нижнем и верхнем слоях грунта была менее 0,01 градуса. Погрешность измерительных приборов составляла не более  $\pm 2,0\%$  по всем шкалам измерения. Схема лабораторной установки приведена на рисунке 3.1.

Пробы грунта брались в районе поймы реки Иртыш. Минерализация грунтовых вод в данном регионе приблизительно равна минерализации водопроводной воды, так как оба водозабора в Павлодаре установлены на этой реке, поэтому грунт увлажнялся водопроводной водой.

Измерения проводились при трех разных напряжениях  $U_1 < U_2 < U_3$ , результаты которых затем усреднялись. При изготовлении установки и проведении измерений руководствовались методикой определения удельного сопротивления грунта, изложенной в ГОСТ 9.602.89 «Единой системы защиты от коррозии и старения».

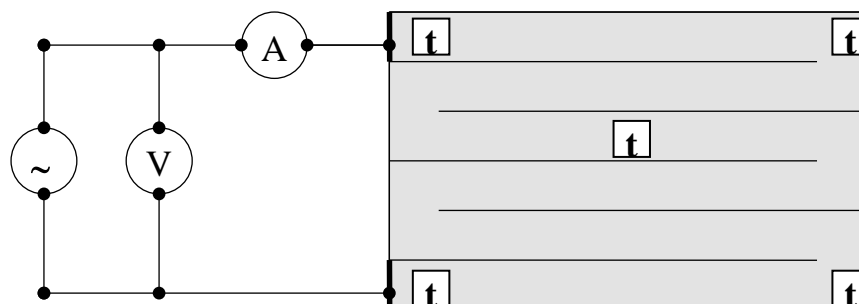


Рисунок 3.1 – Лабораторная установка для определения удельного электрического сопротивления грунта (t – термометр)

Результаты экспериментов по трем видам грунта показали [30], что на интервале влажности от 0 до 2% для песка, супеси от 0 до 5% и глин от 0 и 6% характер изменения  $\rho(v)$  (рисунок 3.2, а) резко отличается от характера изменения  $\rho$  на интервале от 2, 5, 6% для песка, супеси и глин соответственно и до насыщения грунтов влагой (рисунок 3.2, б). Поэтому построение эмпирических зависимостей  $\rho(v)$  было решено выполнять на основе регрессионного моделирования для каждого такого интервала в отдельности, объединяя в одно математическое выражение с помощью инструмента нечеткой логики: системы размытых правил. В данном случае нечетко определяется влажность, которая характеризуется такими понятиями, как:

- "сухо" - примерно от 0 % до 3-4%,
- "умеренно влажно" - примерно от 4 % до 12%,
- "сильно влажно" - примерно от 12 % до насыщения грунта влагой.

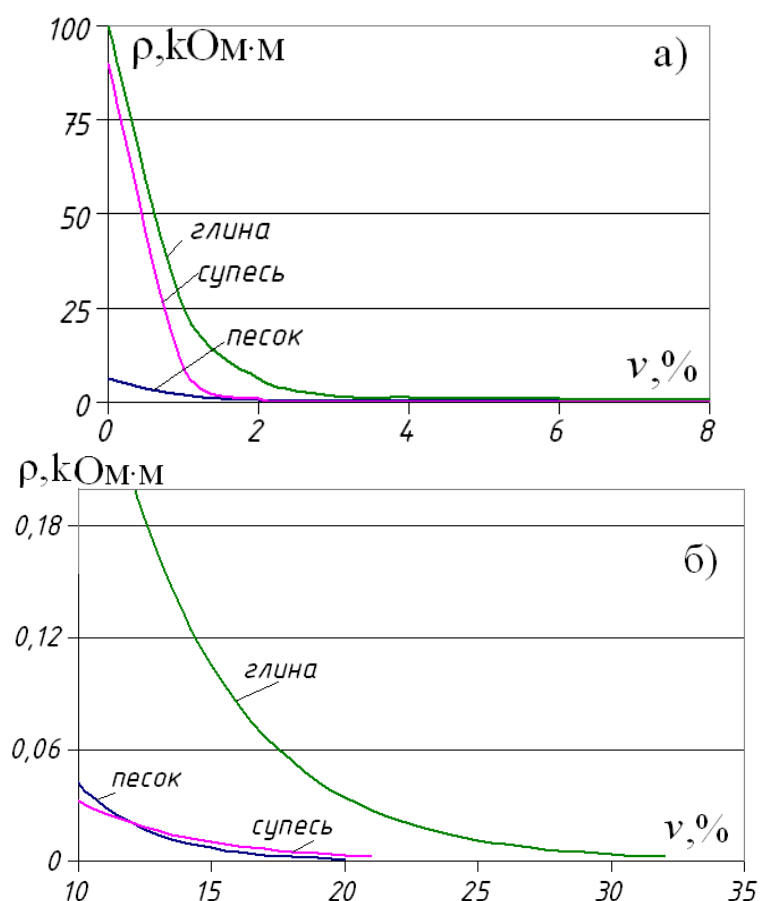


Рисунок 3.2 – Графики изменения удельного электрического сопротивления трех видов грунта на диапазоне влажности от 0 до 8% (а) и от 10% до насыщенного водой состояния (б), полученные в ходе эксперимента.

Для определения функций принадлежности использовался прямой метод, в котором для каждого  $x \in E$  ( $x$  – влажность грунта) задается значение  $\mu_A(x)$  (функция принадлежности). Это правомерно, поскольку метод применяется для измеримых понятий, таких как давление, температура и т.д., а влажность, несомненно, относится к этим понятиям.

Суть модели заключается в следующем. Для описания нечеткой принадлежности к интервалам приняты экспоненциальные функции:

$$\mu_1(x) = e^{(-c \cdot (x-d)^2)} \quad \text{и} \quad \mu_2(x) = 1 - e^{(-c \cdot (x-d)^2)}, \quad (3.1)$$

где коэффициенты  $c$  и  $d$  определяют степень нечеткости и положение на числовой оси параметра влажность..

Первоначально при моделировании  $\rho$  функции  $\eta_i(x)$  определялись в виде:

$$\eta_i(x) = b_0 + b_1 \cdot x, \quad (3.2)$$

где  $x$  – влажность грунта,  $b_0$  и  $b_1$  – параметры уравнения регрессии, оцениваемые по методу наименьших квадратов для каждого из интервалов отдельно.

Общее уравнение моделирования удельного сопротивления имеет следующий вид:

$$\rho = \sum_{i=1}^M \eta_i(x) \cdot \mu_{A_i}(x), \quad (3.3)$$

Принадлежность интервалу «сухо» выражается с помощью функции  $\mu_1(v)$  (3.4), принадлежность интервалам «умеренно влажно» и «сильно влажно» -  $\mu_2(v)$  (3.5) и  $\mu_3(v)$  (3.6) соответственно:

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, & 0 \leq v < 1 \\ e^{-0.8(v-1)^2}, & 1 \leq v < 5 \\ 0, & v \geq 5 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < 1 \\ 1 - e^{-0.8(v-1)^2}, & 1 \leq v < 5 \\ 1, & 5 \leq v < 8 \\ e^{-0.8(v-8)^2}, & 8 \leq v < 12 \\ 0, & v \geq 12 \end{cases} \quad (3.5)$$



$$\mu_3 = \begin{cases} 0, & 0 \leq \nu < 8 \\ 1 - e^{-0.8(\nu-8)^2}, & 8 \leq \nu < 12 \\ 1, & \nu \geq 12 \end{cases} \quad (3.6)$$

На рисунке 3.3 представлены графики функций принадлежности для трех лингвистических понятий влажности. Функции определения  $\rho$  песка для этих понятий влажности -  $\eta_1(\nu)$ ,  $\eta_2(\nu)$  и  $\eta_3(\nu)$ :

$$\begin{aligned} \eta_1(\nu) &= 4.903 - 1.82 \cdot \nu \\ \eta_2(\nu) &= 0.523 - 0.057 \cdot \nu \\ \eta_3(\nu) &= 0.004 - 0.067 \cdot \nu \end{aligned} \quad (3.7)$$

В итоге общая формула определения  $\rho$  (кОм·м) песка выглядит следующим образом:

$$\rho_n(\nu) = (4.9 - 1.8 \cdot \nu) \cdot \mu_1 + (0.5 - 0.06 \cdot \nu) \cdot \mu_2 + (0.004 - 0.07 \cdot \nu) \cdot \mu_3 \quad (3.8)$$

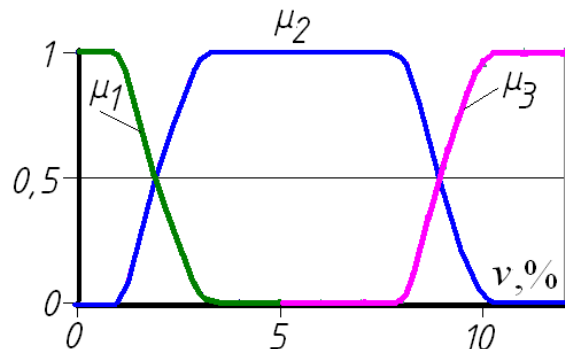


Рисунок 3.3 – Семейство функций принадлежности для трех нечетких интервалов влажности «сухо»- $\mu_1$ , «умеренно влажно» -  $\mu_2$ , «сильно влажно» -  $\mu_3$ .

Зависимости для определения  $\rho$  (кОм·м) супеси и глины представлены выражениями (3.9) и (3.10), соответственно [30]:

$$\rho_c(\nu) = (57.8 - 18.9 \cdot \nu) \cdot \mu_1 + (0.177 - 0.02 \cdot \nu) \cdot \mu_2 + (0.054 - 0.003 \cdot \nu) \cdot \mu_3 \quad (3.9)$$

$$\rho_{gl}(\nu) = (71 - 22 \cdot \nu) \cdot \mu_1 + (1.7 - 0.145 \cdot \nu) \cdot \mu_2 + (0.319 - 0.012 \cdot \nu) \cdot \mu_3 \quad (3.10)$$

При влажности 18% и выше для грунтов песок и супесь и 27% и выше для глин и суглинков значение  $\rho$  принимается равным 2 Ом·м. Рисунок 3.4 иллюстрирует совпадение значений, полученных в ходе эксперимента и с помощью модели. На графиках видно, что прямая плохо описывает поведение  $\rho$  на интервале от 0 до 3%. Поэтому решено было построить модель на основе функции нелинейного вида.

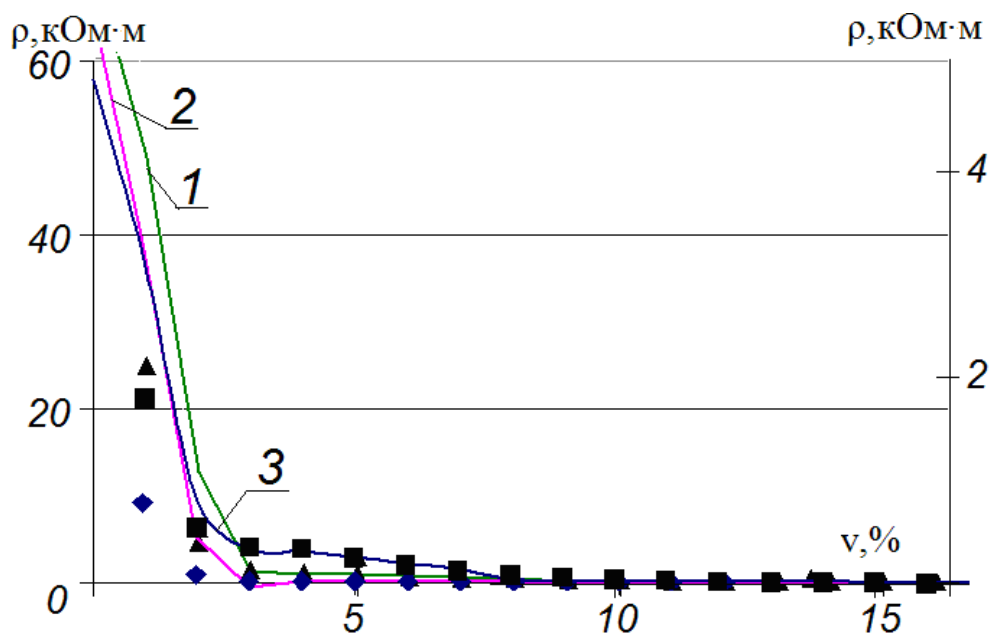


Рисунок 3.4 – Графики зависимостей  $\rho$  (кОм·м) от влажности  $v$  (%) для глины (кривая 1), супеси (кривая 2) и песка (кривая 3, правая шкала), полученные по выражениям 3.10, 3.9 и 3.8 соответственно. Точками указаны значения, определенные в ходе эксперимента.

Построение второй модели велось с помощью показательной функции:

$$\eta_i(x) = b_0 \cdot b_1^x, \quad (3.11)$$

Сравнение значений  $\rho$ , полученных с помощью второй модели с экспериментальными данными позволило при выборе показательного вида функции  $\eta_i(x)$  ограничить количество нечетких интервалов двумя, следовательно, количество функций принадлежности  $\mu$  для переменной "влажность" в данном случае равно двум: «сухо» и «влажно».

Для данной модели функции принадлежности имеют вид [30], показанный на рисунке 3.5, где  $v$  - влажность. Значения интервала влажности  $v_1$  ("сухо") и  $v_2$  ("влажно") определены приблизительно, первый интервал -  $0 \leq v < 2\%$ , второй -  $v \geq 6\%$ , область переключения  $2 \leq v < 6\%$ , функции принадлежности, причем в области, где соседние  $\mu_1$  и  $\mu_2$  имеют ненулевые значения, всегда выполняется равенство:

$\sum_{i=1}^2 \mu_i = 1$ . Ниже представлены выражения, определяющие их значения.

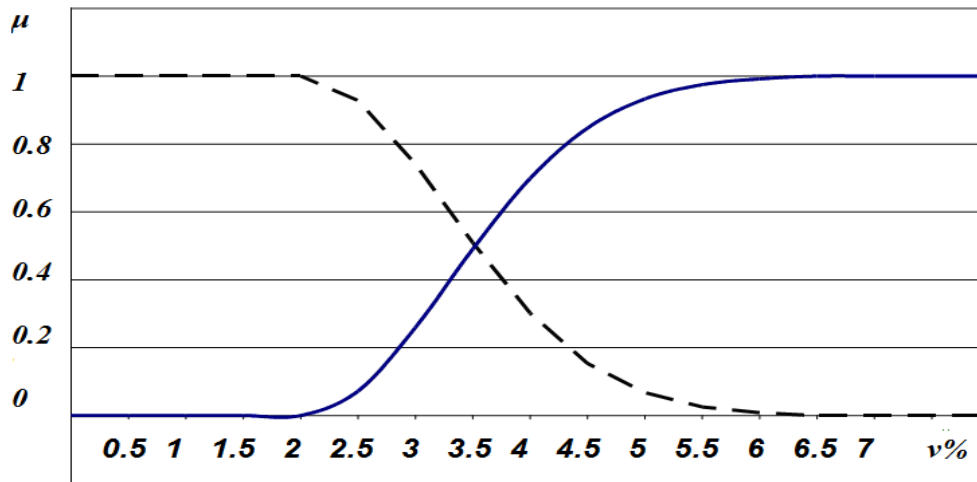


Рисунок 3.5 – Семейство функций принадлежности для нечетких интервалов влажности.

Сплошной линией на данном рисунке изображена функция принадлежности  $\mu$  к нечеткому интервалу, характеризующему значение «сухо», а штриховой линией - функция принадлежности к нечеткому интервалу значения «влажно» ( $v\%$ ).

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, & 0 \leq v < 2 \\ e^{-0.8(v-2)^2}, & 2 \leq v \leq 6, \\ 0, & v > 6 \end{cases}, \quad \mu_2 = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < 2 \\ 1 - e^{-0.8(v-2)^2}, & 2 \leq v \leq 6, \\ 1, & v > 6 \end{cases}, \quad (3.12)$$

В результате уравнения удельного сопротивления для песка  $\rho_n$ , супеси  $\rho_c$  и глины  $\rho_{gt}$  определялись по формулам, где  $v$  – влажность грунта в процентах:

$$\begin{aligned} \rho_n &= 6 \cdot 0,3^v \cdot \mu_1(v) + 1 \cdot 0,7^v \cdot \mu_2(v), \\ \rho_c &= 90 \cdot 0,1^v \cdot \mu_1(v) + 0,3 \cdot 0,8^v \cdot \mu_2(v), \\ \rho_{gt} &= 100 \cdot 0,25^v \cdot \mu_1(v) + 3 \cdot 0,8^v \cdot \mu_2(v). \end{aligned} \quad (3.13)$$

Анализ графиков, приведенных ниже (рис.3.6), позволяет сказать, что данная модель лучше описывает изменение  $\rho$  от влажности. Помимо того, модель гораздо проще: содержит всего два нечетких интервала.

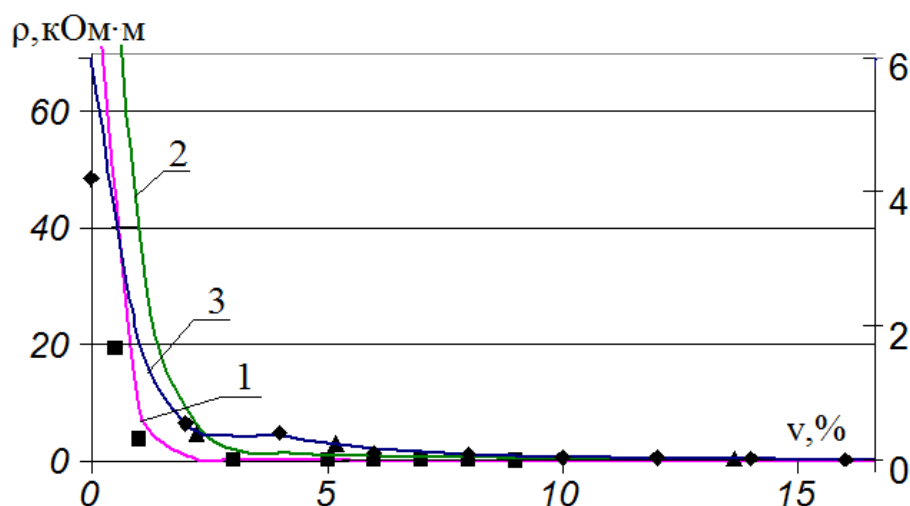


Рисунок 3.6 – Графики зависимости удельного электрического сопротивления глины, супеси и песка от влажности (кривые 1, 2 и 3, соответственно, у песка правая шкала). Точками обозначены значения экспериментальных данных.

При сравнении значений полученных с помощью последней модели (3.13) и справочных данных видно, что модель хорошо описывает зависимость удельного электрического сопротивления от влажности. Например, для песка сильно увлажненного грунтовыми водами, разброс значений удельного сопротивления составляет 10-60 Ом·м [9]. По расчетам с помощью (3.13) для такой же увлажненности получается 10 Ом·м. Для умеренно увлажненного песка - 60-130 Ом·м, в то же время по модели - 70 Ом·м, для слегка влажного песка - 400-1500 Ом·м, по модели - 350 Ом·м при влажности 2%, т.е. на интервале от 5% до насыщения совпадают с экспериментальными точками, а при уменьшении влаги от 5% до нуля отклоняются от них незначительно.

На основе проведенных исследований предлагается моделировать удельное сопротивление грунта при положительных температурах с помощью следующей последовательности действий:

1- экспериментально определяется  $\rho$  при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  при ограниченном количестве значений параметра "влажность" (хотя бы трех для интервала "сухо" и такого же количества для интервала "влажно") рассматриваемого вида грунта;

2 - определяются параметры регрессионных зависимостей для каждого нечеткого интервала системы размытых правил  $A_i$ , где  $i=1,2$ ;

3 – по формуле (3.13) вычисляется значение  $\rho_{20}$  грунта при заданной влажности;

4 - вычисляется значение  $\rho$  для заданной положительной температуры по известной формуле (1.14) [9].

### 3.3. Построение модели удельного сопротивления грунта в зависимости от температуры в области отрицательных ее значений

Известна экспериментальная зависимость расчета удельного электрического сопротивления влагосодержащих грунтов [9] от температуры (1.14). Относительно отрицательных температур отмечается, что при замерзании поровой влаги  $\rho$  грунта возрастает в несколько раз, но какова закономерность этого роста в зависимости от влажности в [8, 9], как и в других известных нам источниках, не указывается.

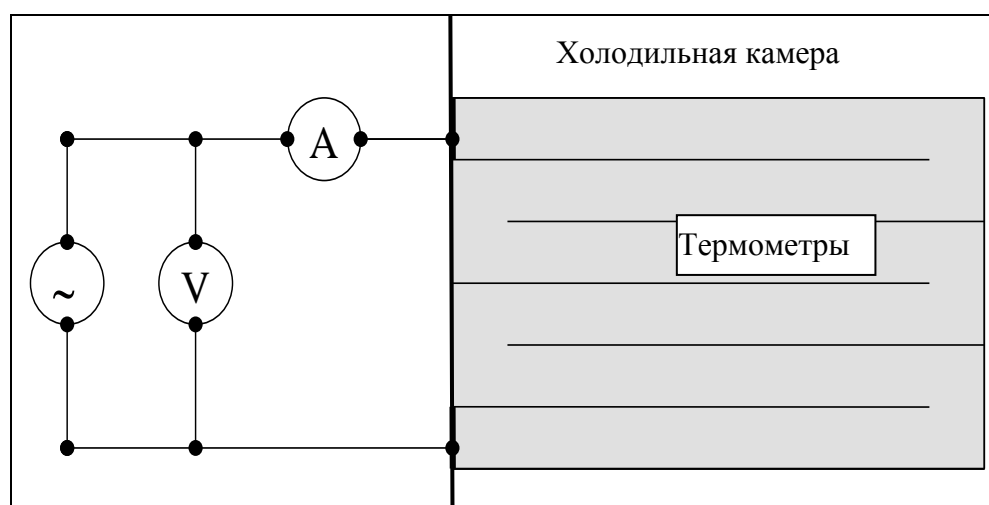


Рисунок 3.7 – Лабораторная установка для определения удельного электрического сопротивления сыпучих грунтов в зависимости от отрицательных значений температуры.

Поэтому решено было произвести ряд экспериментов. Эксперименты потребовали разработки двух видов установок [30]: для сыпучих грунтов и грунтов в виде кернов, извлекаемых при геологоразведках. Для сыпучих грунтов была применена установка, изображенная на рисунке 3.7 с тем

отличием, что контейнер в виде лабиринта поместили в холодильную камеру. В результате установка приняла вид, изображенный на рисунке 3.7.

Для несыпучих грунтов, например для глин и суглинков, вынимаемых в виде кернов из глубин земли, применялась установка, изображенная на рисунке 3.8. К обоим концам образца прижимались электроды, изготовленные так же из медной пластины.

В установки помещался грунт определенной влажности, затем установка подключалась к источнику переменного тока с частотой 50 Гц, и производилось охлаждение грунта. Измерение температуры грунта выполнялось с помощью трех термометров, значения которых усреднялось. Погрешность измерительных приборов составляла не более 0,5% по каждой шкале измерения.

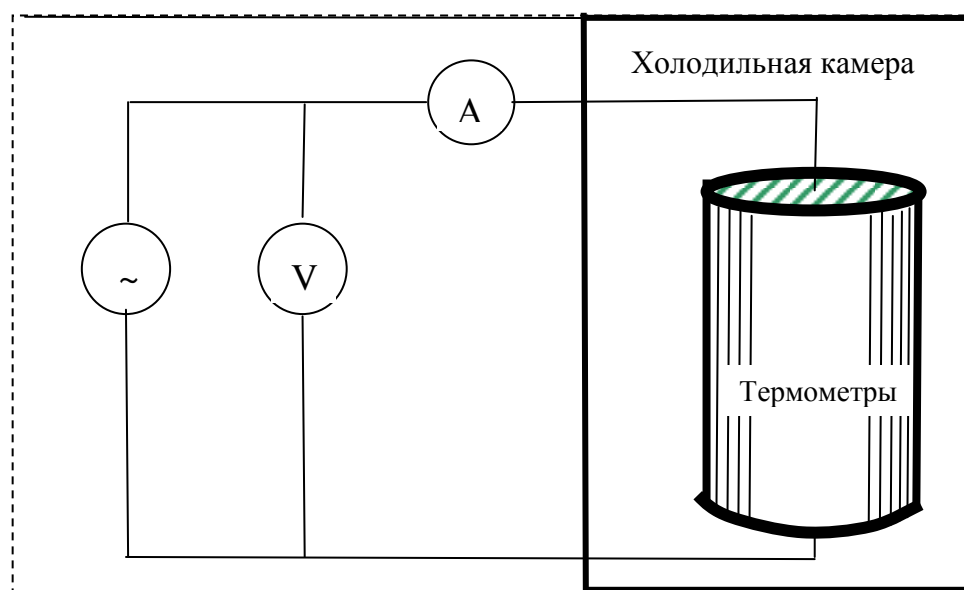


Рисунок 3.8 – Лабораторная установка для определения удельного электрического сопротивления глин и суглинков в зависимости от отрицательных значений температуры.

Измерения проводились при трех разных напряжениях  $U_1 < U_2 < U_3$ , результаты измерений затем усреднялись. Величина значений  $U_1 < U_2 < U_3$  подбиралась таким образом, чтобы можно было замерить ток, например, при проведении экспериментов с супесью 17-ти процентной влажности на пластины подавалось напряжение 60 В, при положительных

значениях температуры, затем, при снижении температуры грунта до  $-10^{\circ}\text{C}$  напряжение на электродах увеличивалось до 160-220 В.

Были произведены эксперименты для грунтов влажностью от 0% до состояния насыщения. При этом было доказано, что формула (1.14) не работает для сухих грунтов и для влагосодержащих в диапазоне от 4 и ниже температур. Эксперименты показали, что при отсутствии влаги при понижении температуры понижается удельное электрическое сопротивление. На рисунке 3.9 представлены графики удельного электрического сопротивления супеси влажностью 0%, полученные в ходе экспериментов и рассчитанные с помощью формулы (1.14).

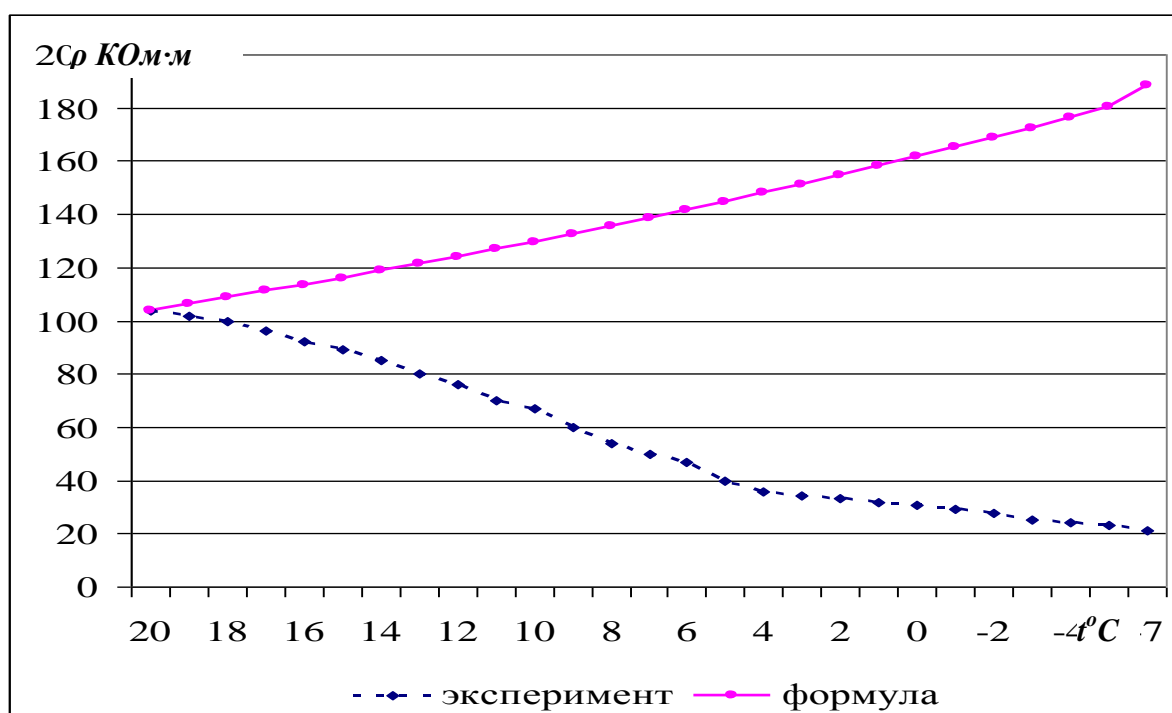


Рисунок 3.9 - Результаты эксперимента и расчета удельного электрического сопротивления по формуле (1.14).

Вид грунта - супесь, влажность 0%

Для влагосодержащих грунтов эксперименты показали, что формула (1.14) хорошо описывает изменение  $\rho$  в диапазоне от 25 до 4  $^{\circ}\text{C}$ . От 4 и до 0  $^{\circ}\text{C}$  имеются незначительные расхождения, а при дальнейшем снижении температуры

появляется значительное расхождение экспериментальных и расчетных значений (см. рис. 3.10).

Экспериментальные зависимости  $\rho$  от температуры (кривые 1-3 на рисунке 3.11) при определенной влажности в диапазоне отрицательных температур для песка и супеси даже ориентировочно не описываются формулой (1.14), по которой построена кривая 4 представленная на рисунке 3.11. При сухом грунте с уменьшением температуры  $\rho$  уменьшается по экспоненте (рис. 3.9), при влажном – в районе от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-1^{\circ}\text{C}$  происходит скачкообразное увеличение  $\rho$  (рис. 3.11), что объясняется кристаллическим строением данных грунтов. Для расчета величины этого скачка для песка и супеси были выведены следующие формулы [30]:

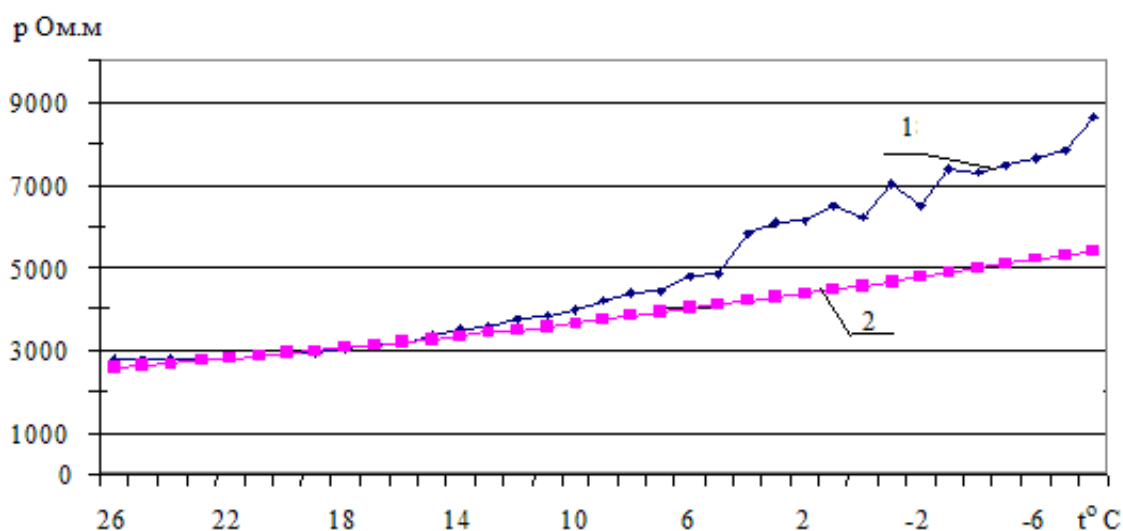


Рис. 3.10 – Результаты эксперимента (кривая 1) и расчета удельного электрического сопротивления (кривая 2) по формуле (1.14). Вид грунта - глина, влажность 5% .

$$\begin{aligned} \rho_{\Pi}^1 &= \rho_{\Pi}^0(-0,03 \cdot v^2 + 0,86 \cdot v - 1,9), \\ \rho_C^1 &= \rho_C^0(0,024 \cdot v^2 - 0,02 \cdot v + 1,2) \end{aligned} \quad (3.14)$$

где  $\rho_{\Pi}^0$  и  $\rho_C^0$  - удельные сопротивления песка и супеси при  $0^{\circ}\text{C}$ , а  $\rho_{\Pi}^1$  и  $\rho_C^1$  при  $-1^{\circ}\text{C}$ .

Расчет удельного электрического сопротивления песка и супеси при температуре ниже  $-1^{\circ}\text{C}$  может быть выполнен с помощью зависимостей [30]:



$$\rho_{II} = \rho_{II}^1 \cdot 0.87^{(t+1)}, \rho_C = \rho_C^1 \cdot 0.88^{(t+1)} \quad (3.15)$$

Для глин и суглинков скачкообразного увеличения  $\rho$  в районе  $0^\circ\text{C}$  не происходит ввиду аморфного строения данного вида грунта (рис. 3.10). Поэтому для расчета удельного электрического сопротивления глин в области отрицательных температур предлагается следующая зависимость:

$$\rho_{гн} = \rho_{гн}^0 \cdot 0.88^{(t+1)}, \quad (3.16)$$

где  $\rho_{гн}^0$  - удельное сопротивление глины при  $0^\circ\text{C}$ . Уравнения (3.14) - (3.16) получены по экспериментальным данным в результате регрессионного моделирования.

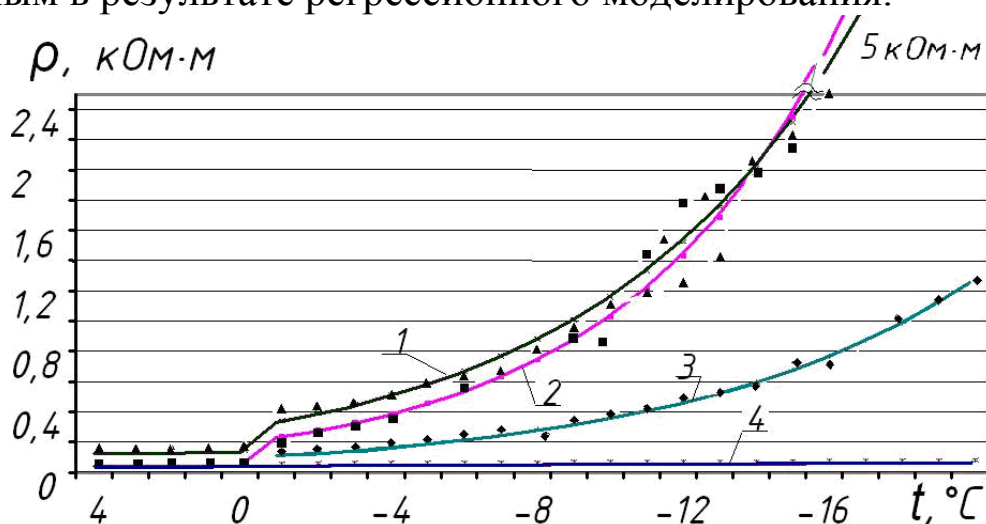


Рисунок 3.11 – Зависимости удельного электрического сопротивления  $\rho$  от температуры  $t^\circ$ , построенные по формулам (3.14), (3.15) для песка влажностью 5% и 16% (кривые 1 и 2) и супеси влажностью 16% (кривая 3), а также по формуле (1.14) для песка влажностью 16% (кривая 4), и экспериментальные данные (■ - песок 16%, ◆ - супесь 16%, ▲ - песок 5%)

Кривые, представленные на рисунке 3.12 можно использовать для определения динамики изменения  $\rho$  супеси и песка в диапазоне от  $+20^\circ\text{C}$  до  $-20^\circ\text{C}$  при любой влажности.

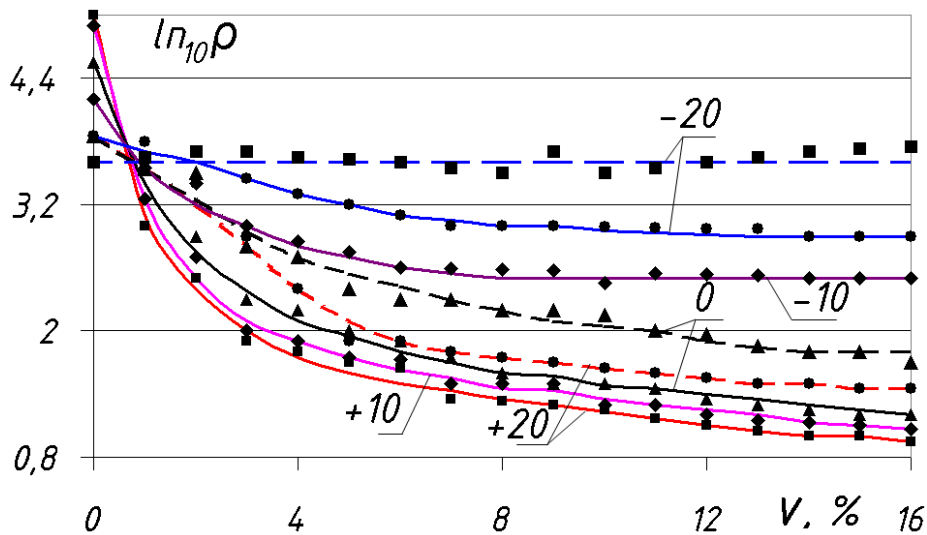


Рисунок 3.12 – Зависимости  $\rho$  от  $v$  % для супеси и песка (сплошные и прерывистые линии) при температурах 20, 10, 0, -10, -20°C

В результате расчет  $\rho$  грунта для любой температуры может быть выполнен по следующей методике:

- для положительных температур  $\rho$  вычисляется по (1.14), где  $\rho_{20}$  значение удельной электропроводности грунта, вычисленное по формуле (3.13),
- для отрицательных температур – значение  $\rho$  корректируется с помощью формул (3.14)-(3.16).

Анализ значений  $\rho$ , полученных с помощью разработанных зависимостей, показывает, что они входят в диапазоны, указанные в [9]. Полученные формулы могут быть применены для определения удельного электрического сопротивления любого типа грунта от влажности и температуры с достаточной для практики точностью.

Анализ значений  $\rho$ , полученных с помощью разработанной модели, показывает, что они входят в диапазоны, указанные в справочнике [9]. Данная методика [30] позволяет строить модели для определения  $\rho$  любого типа грунта от  $v$  и  $t$  с достаточной для практики точностью.

**Пример расчета.** 1) Дано:  $t=9,5^{\circ}\text{C}$ ,  $v=3,5\%$ , грунт супесь.  
 $\rho$  супеси по (3.2)  $\rho_c=(90 \cdot 0,1^v \cdot \mu_1(v)+0,3 \cdot 0,8^v \cdot \mu_2(v)) \cdot \alpha=$   
 $= (90 \cdot 0,1^{3,5} \cdot 0,17+0,3 \cdot 0,8^{3,5} \cdot 0,83) \cdot e^{-0,022 \cdot (9,5-20)} = 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$

2) Дано:  $t=12,65^{\circ}\text{C}$ ,  $v=18\%$ , грунт песок.  
 $\rho$  песка по (3.2)  $\rho_{\text{п}}=(6\cdot 0,3^v\cdot \mu_1(v)+1\cdot 0,7^v\cdot \mu_2(v))\cdot \alpha=$   
 $= (6\cdot 0,3^{18}\cdot 0+1\cdot 0,7^{18}\cdot 1)\cdot e^{-0,022(12,65-20)} = 2,8 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$

### 3.4 Вопросы для проверки знаний

1. Опишите экспериментальную установку.
2. Расскажите ход экспериментов.
3. В чем суть методики расчета удельного электрического сопротивления грунта?
4. Приведите окончательную формулу расчета удельного электрического сопротивления грунта для положительных и отрицательных температур.
5. Как изменяется зависимость удельного сопротивления грунта от температуры и влажности?
6. Перечислите программы для расчета сопротивлений заземлителей. Их преимущества и недостатки.

## 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

### 4.1 Существующие методы определения влажности грунта

Термостатно-весовой метод является основным и наиболее точным методом определения влажности грунта, несмотря на определенные затраты времени [43]. Сущность метода заключается в определении потери влаги при высушивании почвы [44, 45].



Рисунок 4.1 – Наконечник бура для забора проб длиной 60-100 см [43].



Рисунок 4.2 – Емкости с грунтом [43]

Процесс взятия проб выглядит следующим образом:

После прибытия на место взятия проб почвы, выбирается место выбора проб грунта, которое слегка уплотняется для того

чтобы сухой верхний слой в процессе не осыпался. Далее буром (рис.4.1) для забора проб, на котором через каждые 10 см нанесены метки, прокалывают почву на 20, 50 и 100 см, слегка поворачивают бур и вынимают. Высыпают грунт в приготовленную емкость, которую закрывают. Для точности эксперимента забор проб на одной точке делают в трех местах. Все заполненные емкости (рис. 4.2) после транспортируют в лабораторию, где производят их взвешивание и занесение данных в журнал.

Существующий метод определения влажности ( $v$ ) грунта производится в следующем порядке [44, 45]:

а) Пробу, поступившую на анализ, тщательно перемешивают, помешают в пронумерованные и высушенные емкости (стаканчики) и закрывают их крышками, все взвешивается ( $P_1$ ).

б) емкость с грунтом ставится в сушильный шкаф (термостат), где при температуре  $105^{\circ}\pm 2^{\circ}$  производится его сушка (3-4 часа). По окончании сушки взвешиваются: емкость с грунтом ( $P_2$ ) и без грунта ( $P_3$ ).

Влажность грунта определяется отношением (в процентах) веса влаги, содержащейся в грунте, к сухому (установившемуся) весу. Исчисленную таким образом влажность также называют абсолютной влажностью и определяется по формуле [44]:

$$v = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_3} * 100.$$

При отсутствии условий проведения указанного способа влажность грунта определяется следующим способом:

а) в емкость 20x20x20см (объемом  $0,008 \text{ м}^3$  и весом  $P_4$ ) кладется грунт с плотной утрамбовкой и немедленно взвешивается ( $P_5$ );

в) влажность (в %) определяется по формуле, приняв ориентировочно за объемный вес сухого грунта (суглинок, растительный грунт)  $P_6=1600-1700 \text{ кг/м}^3$ :

$$v = \frac{(P_5 - P_4) - P_6 \cdot 0.008}{P_6 \cdot 0.008} \cdot 100.$$

## 4.2 Зависимость влажности грунта от климатических условий

Для определения сопротивления ЗУ необходимо знать удельное электрическое сопротивление  $\rho$  грунта, которое зависит от температуры и влажности  $\nu$  грунта. Нами разработаны два метода, построенные на основе нечеткой логики, которые дают возможность без трудоемких измерений определить влажности грунта в средних широтах: первый – на основе данных метеоцентра для глубин до 1 м, так как на этой глубине из-за влияния климатических условий влажность грунта сильнее подвергается изменению [46]; второй – на глубинах ниже 1 м на основе данных геологоразведочного центра, поскольку на этих глубинах влажность грунта зависит от уровня грунтовых вод. Опыт показывает [14], что на глубинах до 1 м  $\rho$  понижается в весенние и осенние месяцы года, когда из-за тающего снега и дождей резко увеличивается влажность грунта, а увеличение  $\rho$  происходит зимой вследствие замерзания и летом из-за испарения влаги, причем более высокие значения  $\rho$  наблюдаются зимой. Более глубокие слои грунта обладают более стабильным  $\rho$ . Следовательно, заземлители, закопанные глубоко в грунт, выполняют свою задачу лучше и более надежны в работе, чем те, которые прокладывают вблизи поверхности земли [47].

Для определения влажности грунта на глубине до 1 м использовались усредненные данные метеостанции по району Жолболды Павлодарской области (засушливая зона и зона слабого весеннего увлажнения) [48] за 2005-2008 гг., представленные в таблице 4.1. Для определения значимости влияния природных климатических факторов на  $\nu$  грунта были вычислены коэффициенты парной корреляции  $r$  [49], представленные в таблице 4.2. Известно, чем ближе значение абсолютной величины  $r$  к единице, тем ближе к линии регрессии располагаются экспериментальные точки, и тем теснее связь между ними. Например, коэффициент корреляции влажности от выпавших осадков на глубине 20 см равняется 0,66, а на глубине 100 см – 0,79, что значит теснота связи между факторами хорошая.

Таблица 4.1 – Усредненные за месяц данные метеостанции по району Жолболды Павлодарской области за 2005-2008 гг.

Месяцы	Количество выпавших осадков, мм	Температура на поверхности грунта, °С	Влажность воздуха, %	Средняя скорость ветра, м/с	Влажность грунта на глубине 20см, %	Влажность грунта на глубине 100см, %
4	90,3	8,1	5,6	4,7	5,9	5,2
5	18,5	16,6	8	4,5	2,3	2,7
6	43,6	23,1	11,8	3,7	2,8	1,8
7	51,9	24,6	14,3	3,4	1,7	1,4
8	25,1	20,6	12,8	3,9	1,7	1,
9	13,4	13,7	8,8	4,1	1,5	1,5
10	28,8	5,3	5,7	4,2	4,6	2,3

Таблица 4.2 – Значение коэффициентов корреляции влажности грунта от перечисленных факторов

Глубина залегания слоя грунта	Коэффициент корреляции $r$ между величинами			
	среднемесячная влажность воздуха и $\nu$ слоя грунта	среднемесячная скорость ветра и $\nu$ слоя грунта	среднемесячная температура поверхности грунта и $\nu$ слоя грунта	среднемесячное количество выпавших осадков и $\nu$ слоя грунта
20см	-0,73	0,61	-0,81	0,66
100см	-0,72	0,73	-0,66	0,79

С помощью метода наименьших квадратов получили многофакторную модель в виде линейной функции, которая выглядит следующим образом:

$$v_{20} = 4,2 + 0,034 \cdot o_c - 0,17 \cdot t_{nz};$$

$$v_{100} = 2,5 + 0,028 \cdot o_c - 0,085 \cdot t_{nz};$$

где  $o_c$  - количество осадков, мм,  $t_{nz}$  - температура на поверхности грунта, °С.

Для оценки полученной модели и определения процента разброса функции  $\nu$  относительно ее среднего значения в зависимости от количества выпавших осадков и температуры на поверхности грунта находили коэффициент

детерминированности  $B_{yx}$  [49]. Он равен:  $B_{yx}=0,7$  для глубины 20 см,  $B_{yx}=0,84$  для 100 см. Эти значения близки к единице, что означает: все эмпирические значения (все точки поля корреляции) лежат близко к регрессионной прямой. В этом случае говорят о линейном соотношении (линейной функции), т.е. различие между фактическими и полученными значениями  $v$  мало.

Если к модели добавить такой параметр как скорость ветра, то она будет иметь вид:

$$\begin{aligned} v_{20} &= 8,06 + 0,03 \cdot o_c - 0,20 \cdot t_{нз} - 0,81 \cdot v_в; \\ v_{100} &= -4,10 + 0,03 \cdot o_c - 0,007 \cdot t_{нз} + 1,3 \cdot v_в, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где  $v_в$  – средняя скорость ветра, м/с.

Здесь  $B_{yx} = 0,9$  для глубины 20см,  $B_{yx} = 0,96$  для 100 см т.е. с добавлением параметра скорости ветра модель стала точнее.

Если же учесть также и влажность воздуха, то полученная многофакторная модель примет вид:

$$\begin{aligned} v_{20} &= 9,28 + 0,036 \cdot o_c - 0,14 \cdot t_{нз} - 0,98 \cdot v_в - 0,17 \cdot v_b; \\ v_{100} &= 0,6 + 0,027 \cdot o_c + 0,014 \cdot t_{нз} + 0,51 \cdot v_в - 0,17 \cdot v_b, \end{aligned}$$

где  $v_b$  - влажность воздуха.

Здесь коэффициенты  $B_{yx}=0,91$  для глубины 20 см,  $B_{yx}=0,97$  для 100см. Но для ее упрощения можно не учитывать указанный параметр, так как погрешность расчета уменьшается незначительно.

Для построения единой формулы, по которой можно было бы определять влажность на любой глубине от 0 до 1 м с применением полученных зависимостей(4.1) были использованы основы теории нечетких множеств [50]. В данном случае «влажность на глубине» - определено как нечеткое понятие с двумя термами: «близко от поверхности» и «далеко от поверхности» с функциями принадлежности (ФП)  $\mu_1(h)$  и  $\mu_2(h)$ . Соответственно, будет два интервала: первый -  $0 \leq h < 20$ см, второй -  $h \geq 100$ см, где  $h$  – глубина грунта, на которой необходимо найти влажность. Такие границы интервалов выбраны в связи с тем, что метеостанции предоставляют данные по влажности  $v_{20}$  и  $v_{100}$  на глубинах 20 и 100 см соответственно. Область переключения между интервалами:  $20 \leq h < 100$  см. Если имеется два интервала, то в



теории нечеткой логики рекомендуется в качестве  $\mu_1(h)$  и  $\mu_2(h)$  выбирать стандартные: Z- и S-функции принадлежности (ФП). При этом для терма «близко от поверхности» на первом интервале  $\mu_1(h)=1$ , на втором  $\mu_1(h)=0$ , а для терма «далеко от поверхности»  $\mu_2(h)=1-\mu_1(h)$ . На интервале переключения  $\mu_1(h)=1-\frac{h-20}{100-20}$ , определяемого так: если  $\mu_1(h)$  убывающая, то  $\mu_1(h)=1-\mu_2(h)$ , а

$$\mu_2(h_{ГВ}) = \frac{h-20}{100-20} = \frac{x-a}{b-a}.$$

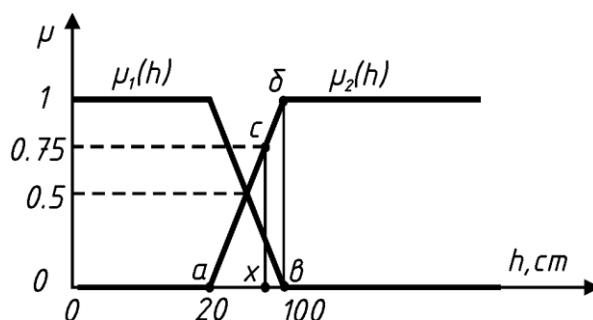


Рисунок 4.3 - Семейство ФП для определения влажности по глубинам

Последняя вычисляется из соотношения сторон  $ab/ax = \delta v/cx$  треугольников  $abv$  и  $xac$ , т.к. они подобны (рис. 4.3). Соответственно для терма «нижний»  $\mu_2(h)=1-\mu_1(h)$  на этих же интервалах. Отметим, что для построения ФП масштаб по оси ординат не имеет значения.

ФП  $\mu_1(h)$  и  $\mu_2(h)$  имеют вид [51]:

$$\mu_1(h) = \begin{cases} 1, & 0 \leq h < 20 \\ 1 - \frac{h-20}{80}, & 20 \leq h < 100 \\ 0, & h \geq 100 \end{cases}, \quad \mu_2(h) = \begin{cases} 0, & 0 \leq h < 20 \\ \frac{h-20}{80}, & 20 \leq h < 100 \\ 1, & h \geq 100 \end{cases}. \quad (4.2)$$

В результате влажность грунта на глубине  $h$  представляется так:

$$v_h = v_{20} \cdot \mu_1(h) + v_{100} \cdot \mu_2(h). \quad (4.3)$$

Функции  $v_{20}$  и  $v_{100}$  находятся по данным метеостанций для каждого месяца (за исключением периода промерзания грунта), например для Павлодарской области (засушливая зона и зона слабого весеннего увлажнения) по формуле (4.1) за 2005-2008 гг. Влажность грунта на глубинах до 1 м в период его замерзания (с ноября по февраль) не изменяется, так как осадки накапливаются в виде снега и льда на поверхности земли и не проникают вглубь, поэтому метеостанциями в этот период она не измеряется.

Для нахождения влажности в любое время года на глубине до 1 м была введена лингвистическая переменная «месяц» с двумя термами «холодный» и «теплый». В первый временной интервал моделирования входят месяцы, в которых температура воздуха устойчиво держится ниже нуля градусов Цельсия (для рассматриваемой климатической зоны с ноября по февраль), во второй – с апреля по октябрь. Таким образом, можно считать, что ФП  $\mu_1(m)=1$  и  $\mu_2(m)=0$  с ноября по февраль для первого терма «холодный», а с апреля по октябрь –  $\mu_1(m)=0$  и  $\mu_2(m)=1$  для второго терма «теплый», где  $m$  - номер месяца.

Интервал переключения – март (месяц активного снеготаяния) и октябрь (месяц, когда температура грунта приближается к отрицательным значениям). Причем, для северных широт в месяц активного снеготаяния количество осадков, накопленное в виде снежного покрова за зимние месяцы, рассчитывается их суммированием, например для Павлодарской области с ноября по март, для южных широт (температура на поверхности грунта больше нуля в течение года) -  $\mu_1(m)=1$  и  $\mu_2(m)=0$ . ФП представлены в виде П-образной функции (рис.4.4) и имеют вид [51]:

$$\mu_1(m) = \begin{cases} 0, & m \leq 3, m \geq 11 \\ \exp(-3 \cdot (m-4)^2), & 3 < m \leq 4 \\ 1, & 4 \leq m \leq 10 \\ \exp(-3 \cdot (m-10)^2), & 10 \leq m \leq 11 \end{cases} \quad \text{и } \mu_2(m) = 1 - \mu_1(m). \quad (4.4)$$

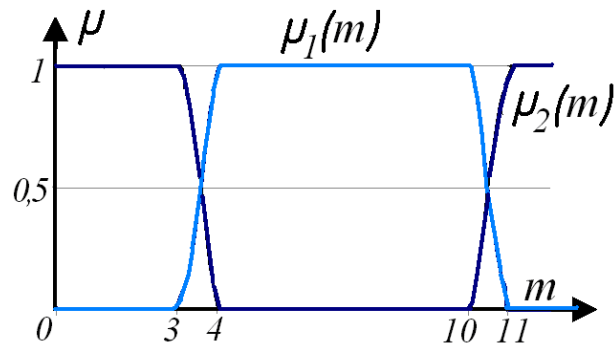
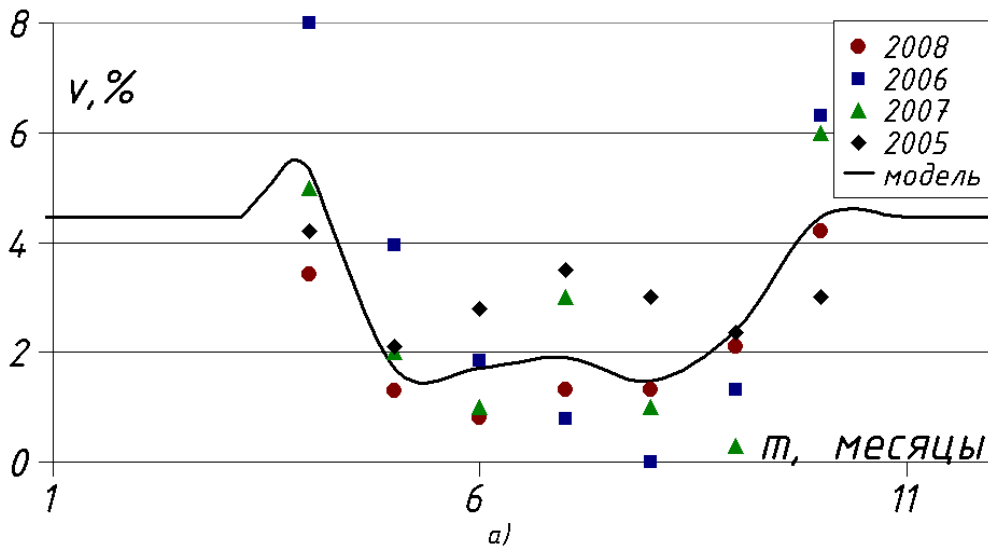


Рисунок 4.4 - Семейство ФП для определения влажности по месяцам

В результате для глубины 1м влажность в зависимости от  $o_c, t_{нз}, v_8$  и времени года (по месяцам) вычисляется по формуле:

$$v = \sum_{i=1}^2 \eta_i(m) \cdot \mu_i(m) = \eta_1(m) \cdot \mu_1(m) + \eta_2(m) \cdot \mu_2(m), \quad (4.5)$$

где  $\eta_1(m) = v_h^{(m=10)}$  - влажность за октябрь, рассчитанная по (4.3). Так как для рассматриваемого региона в зимние месяцы ( $m=11, 12, 1, 2$ )  $v$  не изменяется.  $\eta_2(m) = v_h$  - влажность за теплые месяцы ( $m=4 \div 10$ ) по (4.3). Так, в соответствии с правилами нечеткой логики [50], склеиваются два разных понятия влажности в зависимости от глубины  $h$  и месяца  $m$ .



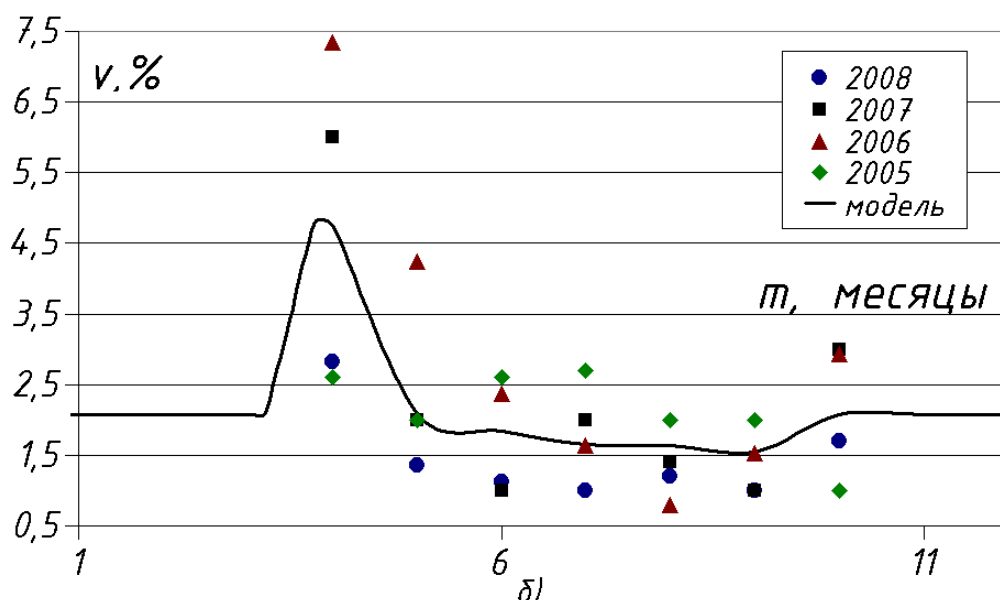


Рисунок 4.5 – Сопоставление полученной зависимости влажности с данными метеостанции за 2005-2008 гг.:  
а - на глубине 0,2 м, б – 1 м.

Адекватность модели доказана по критерию Фишера [41]. На рисунке 4.5 представлена зависимость влажности  $v$  грунта от климатических условий и от времени года, построенная по усредненным за 4 года данным метеостанции. Как видно из рисунка 4.5, полученная зависимость (4.5) позволяет в рассматриваемом регионе находить влажность грунта на глубине до 1 м с погрешностью не превышающей 25%. Она может быть использована при проектировании заземляющих устройств в последующие годы. Отметим, что погрешность определения влажности для каждого упомянутого года в отдельности значительно меньше.

#### 4.3 Определение влажности грунта на глубинах ниже 1 м

Влажность на этих глубинах практически не зависит от климатических условий, а меняется в зависимости с расстоянием(м) до уровня грунтовых вод  $h_{ГВ}$ . В разработанном методе на базе нечеткой логики [32] используется высота капиллярного поднятия воды  $h_{КП}$  (для песка – 0,5 м, для супеси – 1 м, для глины – 2,5 м [52]) и данные геологоразведочного центра. В модель введена лингвистическая переменная [32]: «близость грунтовых вод» -  $h_{ГВ}$  с двумя термами: первый «рядом» с функцией принадлежности  $\mu_1(h_{ГВ})$  и второй

«далеко» с  $\mu_2(h_{ГВ})$ . Первому терму соответствует промежуток  $0 \leq h_{ГВ} < 0,8h_{КП}$  м ( $0,8h_{КП}$  выбрано потому, что с этого расстояния грунт начинает высыхать); второму –  $h_{ГВ} \geq h_{КП}$ , м; интервал переключения -  $0,8h_{КП} \leq h_{ГВ} < h_{КП}$ , м. Тип ФП для двух интервалов выбран: в виде Z- и S-функций. Для терма «рядом» на первом интервале  $\mu_1(h_{ГВ})=1$ , на втором  $\mu_1(h_{ГВ})=0$ , на интервале переключения  $\mu_1(h_{ГВ})=1 - \frac{h_{ГВ} - 0,8 \cdot h_{КП}}{0,2 \cdot h_{КП}}$ .

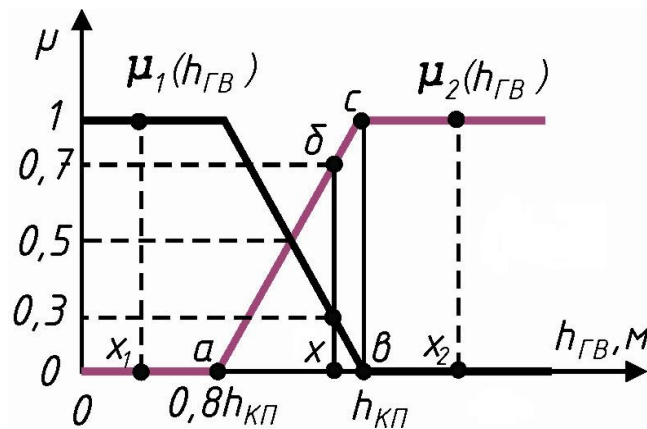


Рисунок 4.6 – ФП  $\mu_1(h_{ГВ})$  и  $\mu_2(h_{ГВ})$

Вторая функция принадлежности  $\mu_2(h_{ГВ})$  определяется так: если  $\mu_1(h_{ГВ})$  убывающая, то  $\mu_1(h_{ГВ})=1-\mu_2(h_{ГВ})$  должна быть возрастающая, следовательно  $\mu_2(h_{ГВ}) = \frac{x-a}{b-a} = \frac{h_{ГВ} - 0,8 \cdot h_{КП}}{h_{КП} - 0,8 \cdot h_{КП}}$  (она вычисляется из соотношения сторон  $av/ax=sv/bx$  треугольников  $асв$  и  $хва$ , т.к. они подобны: см. рис. 4.6). Для терма «далеко»  $\mu_2(h_{ГВ})=1-\mu_1(h_{ГВ})$  на этих же интервалах. Отметим, что для построения функций принадлежности масштаб по оси ординат не имеет значения. Они представлены на рисунке 4.6 и имеют вид [51]:

$$\mu_1(h_{ГВ}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq h_{ГВ} < 0,8h_{КП}; \\ 1 - \frac{h_{ГВ} - 0,8 \cdot h_{КП}}{0,2 \cdot h_{КП}}, & 0,8 \cdot h_{КП} \leq h_{ГВ} \leq h_{КП}; \\ 0, & h_{ГВ} \geq h_{КП} \end{cases} ; \quad \mu_2(h_{ГВ}) = 1 - \mu_1(h_{ГВ}). \quad (4.6)$$

Формула для определения  $v$  запишется так  $v = \sum_{i=1}^2 \eta_i(h_{ГВ}) \cdot \mu_i(h_{ГВ})$ . Зависимость  $\eta_1(h_{ГВ})$  построена по данным геологоразведочного центра, например для песка  $\eta_1(h_{ГВ}) = 18 - 27 \cdot h_{ГВ}$ , а значение  $\eta_2(h_{ГВ})$  взято как средняя влажность естественного залегания грунта (например, 4.5% - влажность естественного залегания песка). В результате получены формулы [51]:

$$\begin{aligned} v_{песок} &= (18 - 27 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 4,5 \cdot \mu_2(h_{ГВ}); \\ v_{супесь} &= (23 - 19,3 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 3,5 \cdot \mu_2(h_{ГВ}); \\ v_{глина} &= (50 - 12,8 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 18 \cdot \mu_2(h_{ГВ}), \end{aligned} \quad (4.7)$$

где 18, 23, 50 – это максимальная влагоемкость (способность удерживать воду) песка, супеси и глины соответственно, 27, 19.3 и 12.8 – коэффициенты, полученные по методу наименьших квадратов, учитывающие капиллярное поднятие воды.

Например, для песка на глубине  $h=5,2$  м (точка  $x_1$ , рис. 4.7) нужно определить влажность грунта при уровне грунтовых вод  $h_{ГВ}=5$  м. Рассчитывается  $h_{ГВ} = |h - h_{ГВ}| = 0,2$  м., что соответствует терму «близко», т.к.  $0 \leq h_{ГВ} < 0,8h_{КП}$  с ФП  $\mu_1(h_{ГВ})=1$  и  $\mu_2(h_{ГВ})=0$  (рис. 4.4) по (4.6), влажность  $v = 18 - 27 \cdot h_{ГВ} = 12,6\%$ . Если  $h=5,8$  м (точка  $x_2$ ), то  $h_{ГВ}=0,8$  м,  $\mu_1(h_{ГВ})=0$ ,  $\mu_2(h_{ГВ})=1$ ,  $v=4,5\%$ . Если  $h=5,47$  м (точка  $x$ ), то  $h_{ГВ}=0,47$  м. Поскольку эта точка лежит на интервале переключения  $0,8 \cdot h_{КП} \leq h_{ГВ} \leq h_{КП}$ , то ФП  $\mu_2(h_{ГВ}) = \frac{h_{ГВ} - 0,8 \cdot h_{КП}}{0,2 \cdot h_{КП}} = 0,7$ ,  $\mu_1(h_{ГВ}) = 0,3$  и по (4.7) определяем  $v=4,7\%$ .

С помощью данной модели были произведены расчеты  $v$  для ряда скважин районов Павлодарской и Новосибирской областей. Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования показало, что погрешность расчета не превышает 20% для сухих и 10% для влажных грунтов. На рисунке 4.8 представлены кривые 1 и 2, построенные по (4.7) для трех слоев (супесь, песок и глина) по данным 3 геологоразведочных скважин в районе Павлодарской области (скважина 255 от 14.03.2006 г. и скважина 405 от

26.05.2006 г.). Кривые 1 и 2 имеют скачки влажности  $v$ : первый резкий скачок  $v$  объясняется наличием грунтовых вод на глубине 3,5 м и 2,5 м, соответственно, второй – из-за разной влагоемкости каждого слоя песка и глины. Причем, для песка  $v$  максимальна с 4 м до 4,5 м (кривая 1) и с 3 м до 9 м (кривая 2), т.к. на этой глубине находятся грунтовые воды.

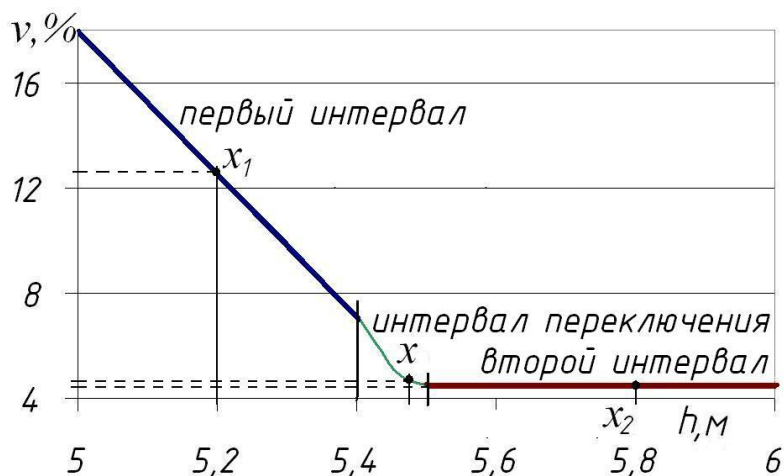


Рисунок 4.7 – Определение влажности песка

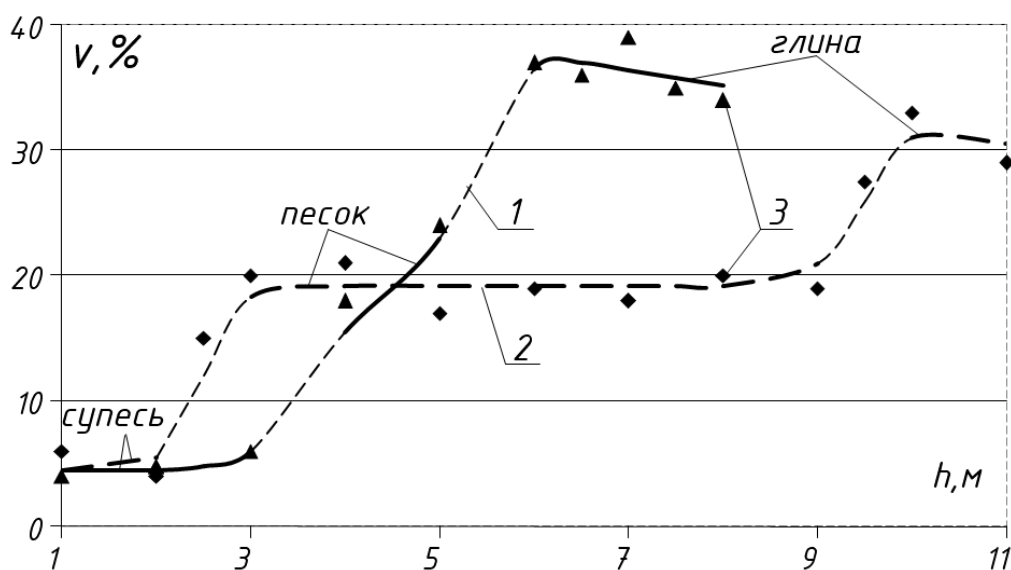


Рисунок 4.8 – Зависимость влажности (кривые 1, 2) от глубины и данные (3,4) геологоразведочной фирмы ТОО «Изыскатель».

Адекватность модели подтверждена с помощью критерия Фишера [39]. Таким образом, зная количество слоев, их вид и глубину залегания грунтовых вод, по формуле (4.7) можно определить влажность в любое время года на глубинах более 1 м с

погрешностью расчета не выше 20% для сухих и 10% для влажных грунтов, что дает погрешность расчета  $\rho$ –15%.

### **Выводы**

1. Разработаны методы для определения влажности грунта: первый в зависимости от климатических условий с погрешностью не выше 25% для глубин до 1 м с использованием данных метеостанций, а второй – от уровня грунтовых вод - ниже 1 м с погрешностью не выше 20% для сухих и 10% для влажных грунтов на основе данных геологоразведочного центра. В отличие от известных, они основаны на использовании нечеткой логики.

2. Предложенные методы позволяют рассчитывать удельное электрическое сопротивление  $\rho$  грунта по [30], не делая трудоемких измерений влажности на глубине залегания заземлителей.

### **4.4 Вопросы для проверки знаний**

1. Как определяется влажность грунта до 1 м? Какие исходные данные для этого используются?

2. Какова последовательность определения влажности ниже 1 м?

3. Каким образом используется нечеткая логика в выше указанных методах, методика построения нечеткой модели?

4. Каково влияния влажности грунта на его удельное электрическое сопротивление?

5. Какова максимальная влагоемкость песка, супеси, суглинка и глины?



## 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТА

### 5.1 Существующие методы определения температуры грунта

Температурный режим грунта зависит от особенностей географического положения, его физических свойств, сезона года, времени суток, погодных условий, влажности, и многих других факторов [53, 54].

Годовой ход температуры поверхности грунта определяется различным приходом солнечной радиации в течение года и имеет колебательный характер. Разность между максимумом и минимумом называется амплитудой хода температуры. Наименьшие  $t$  на поверхности грунта наблюдаются в январе – феврале, наибольшие – в июле или августе. На амплитуду годового хода температуры поверхности земли влияют такие факторы [55]: рельеф местности: по сравнению с равниной (южные склоны нагреваются быстрее, а северные – слабее), соответственно изменяется и амплитуда; растительный и снежный покров, амплитуда суточного хода температуры под этими покровами меньше, чем при их отсутствии, так как они уменьшают нагрев и охлаждение поверхности грунта; цвет грунта: амплитуда суточного хода температуры поверхности темных грунтов больше, чем светлых, поскольку поглощение и излучение радиации у первых больше, чем у вторых; состояние поверхности: рыхлые грунты имеют большую амплитуду, чем плотные, так как в последних тепло распространяется в глубь, а в рыхлых остается в верхнем слое и они больше нагреваются; влажность грунта: на поверхности влажных грунтов амплитуда меньше, чем на поверхности сухих (на испарение затрачивается тепло).

В данной главе предпринята попытка учесть изменения  $t$  на основе использования среднемесячных значений температур по данным метеостанции [56]. Для решения поставленной задачи используются следующие сведения [55], полученные исходя из теории молекулярной теплопроводности Фурье:

- для всех типов грунта период колебания температуры с глубиной не изменяется, то есть на поверхности грунта и на всех глубинах интервал между последовательными максимумами и минимумами в суточном ходе составляет 24 часа, а в годовом- 12 месяцев;

- возрастание глубины в арифметической прогрессии приводит к уменьшению амплитуды температуры  $t$  в геометрической прогрессии.

Годовые колебания  $t$  распространяются в глубину с уменьшением амплитуды по тому же закону. (Районы вечной мерзлоты не рассматриваются). Нас интересуют глубины, не превосходящие 15-20 м в средних и около 10 м в южных широтах, так как при приближении к ним амплитуда годового колебания  $t$  стремится к нулю. Дальнейшее изменение  $t$  с увеличением глубины можно учитывать исходя из того, что на каждые 100 м  $t$  увеличивается на  $3^{\circ}\text{C}$  [56] в соответствии с зависимостью, представленной в [57]. Суточное изменение температуры на поверхности отражается и на ее распределение по глубине, но только до 70-100 см [55]. Максимальные и минимальные  $t$  на глубинах наступают позднее, чем на поверхности, причем, запаздывание прямо пропорционально глубине. Суточные максимумы и минимумы запаздывают на каждые 0,1 м в среднем на 2,5-3,5 часа, а годовые – на каждый 1 м глубины на 20-30 суток. Осложнения в расчетах вызываются неоднородностью состава и структуры грунта, и тем, что тепло распространяется вместе с осадками вглубь, не подчиняясь законам молекулярной теплопередачи. Однако, наблюдения показывают, что фактическое распределение тепла в грунте достаточно близко соответствует этим законам.

Если определять температуру грунта непосредственно, то ее измеряют с использованием дистанционных датчиков или ртутных «заленивленных» термометров. Порядок измерения температуры грунтов производится в следующем порядке (цитирован из [58]):

1) В месте измерения температуры – скважине проверяют рабочую глубину, отсутствие в ней воды или снежной шубы, опускают термоизмерительную гирлянду на заданную глубину и оставляют на период выдержки.

Время выдержки  $\tau_{\Delta}$ , ч, гирлянды «заленивленных» ртутных термометров в скважине определяют по формуле:

$$\tau_{\Delta} = \tau_0 \ln \left[ \frac{t_e - t_s}{\Delta t} \right] \quad (5.1)$$

где  $\tau_0$  - показатель тепловой инерции, ч;  $t_e$  - исходная температура (температура наружного воздуха во время измерения),  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_s$  - ожидаемая температура грунта в скважине

(принимается ориентировочно с погрешностью до  $\pm 2^\circ\text{C}$ ),  $^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t$  - допускаемая погрешность за счет ограничения времени выдержки,  $\Delta t \leq 0,05^\circ\text{C}$ .

2) В скважину в полевом журнале записывают: номер скважины, дату ее проходки и обустройства, номер гирлянды, дату и время ее установки, температуру наружного воздуха, измеренную с помощью термометра-праща; оценивают период выдержки гирлянды в скважине.

3) Затем в скважине производят измерения температуры грунта. Если используются гирлянды дистанционных датчиков, разъемы которых подключают к измерительному прибору, последовательно по всем каналам гирлянды снимают и записывают в журнал показания температуры грунта. Если применять ртутные «заленивленные» термометры, то их извлекают по одному из скважины, не допуская попадания на термометр прямых солнечных лучей, и записывают данные. Затем производят оценку значений температуры путем сопоставления их между собой или с данными предыдущих измерений. При наличии аномальных отклонений измерения повторяются.

4) По окончании измерений переносную гирлянду извлекают из скважины, саму скважину закрывают пробкой.

## **5.2 Определение температуры грунта на основе ее среднемесячных значений**

Этот раздел посвящен разработке метода определения температуры  $t$  вглубь почвы с учетом климатических изменений, как основа для методологии определения удельного электрического сопротивления [59].

Разброс температур на интересующей исследователя глубине можно вычислить по формуле:  $t_{II} \pm A_h$  (получена нами на основе анализа разброса  $t$ , проведенного в [55]), где  $t_{II}$  – температура слоя постоянной годовой температуры,  $A_h$  - амплитуда годового колебания  $t$  ( $^\circ\text{C}$ ) на глубине  $h$  (м) от поверхности грунта, причем [60]:

$$A_h = A_{II} \cdot \left( \frac{A_{III}}{A_{II}} \right)^{\frac{h}{h_{II}}}, \quad (5.2)$$

где  $h_{\Pi}$  – глубина постоянной годовой  $t$  (для средних широт она равна 15м);  $A_{\Pi T}$  – амплитуда колебания  $t$  на глубинах с постоянной годовой температурой, приблизительно  $A_{\Pi T} \approx 0,1^{\circ}\text{C}$ ;  $A_{\Pi} = \frac{t_{\Pi \max} - t_{\Pi \min}}{2}$ , где  $t_{\Pi \max}$  и  $t_{\Pi \min}$  – максимальная и минимальная среднемесячная  $t$  поверхности грунта за год для данной местности. Так, например, на рисунке 5.2 представлен годовой ход изменения  $t$  для Калининграда при  $A_{\Pi} = 10,5^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\Pi} = 8^{\circ}\text{C}$  [55] и для Ставрополя (почва – чернозем) при  $A_{\Pi} = 12^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\Pi} = 10^{\circ}\text{C}$  [61].

Для моделирования колебания  $t$  на заданной глубине, на основе вышесказанного и анализа данных метеостанций, нами разработана следующая формула [62]:

$$t = t_{\Pi} - A_h \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{365}(g - 20 \cdot h)\right], \quad (5.3)$$

где коэффициент «20» – учитывает запаздывание (в сутках) максимума (минимума) годового колебания  $t$  на 1м глубины относительно  $t$  поверхности грунта (например, если максимум  $t$  поверхности наблюдается в июле, то на глубине в 5 м он будет через 100 суток);  $g$  – дни.

Теперь, получив значение температуры слоя постоянной годовой температуры  $t_{\Pi}$ ,  $t_{\Pi \min}$ ,  $t_{\Pi \max}$ , мы можем вычислить амплитуду колебания  $A_{\Pi}$  температуры на поверхности грунта,  $A_h$  по (5.2), и получить разброс температур на интересующей исследователя глубине по (5.3).

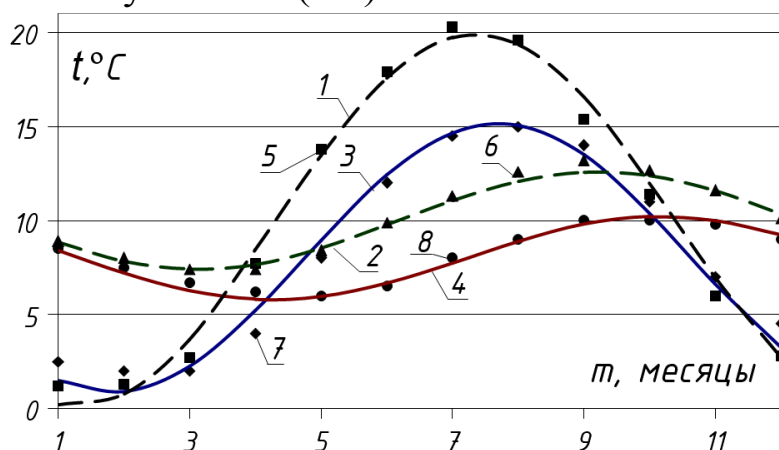


Рисунок 5.2 – Зависимость годового хода температуры на глубинах 0,4 м и 3,2 м для г. Ставрополя (кривые 1, 2), на глубинах 1,25 м, 5,08 м для г. Калининграда (кривые 3, 4) и данные метеостанции (кривые 5, 6, 7 и 8), взятые из [55] и [61].

Проверка адекватности метода выполнялась для регионов средней широты и южной широты: Калининграда [55], Павлодара (данные метеостанции за 2005–2008 гг.), Пскова, Владивостока и Ставрополя [61]. На рисунке 5.3 приведены смоделированные графики годового хода изменения  $t$  на поверхности грунта (кривая 1) и на глубинах 0,8 м (кривая 2) и 3,2 м (кривая 3) при  $A_{II}=15^{\circ}\text{C}$  и  $t_{II}=8^{\circ}\text{C}$  для г. Павлодара. Цифрами 4, 5 и 6 отмечены среднемесячные  $t$ . На рисунке 5.4 представлены зависимости годового хода  $t$  для г. Пскова (грунт суглинок) при  $A_{II}=10^{\circ}\text{C}$  и  $t_{II}=7^{\circ}\text{C}$  и для г. Владивостока  $A_{II}=14^{\circ}\text{C}$  и  $t_{II}=8^{\circ}\text{C}$  при на глубинах 0,4 м (кривая 1, 3), 1,6 м (кривая 2), 3,2 м (кривая 4) и данные метеостанции, помеченные цифрами 5, 6, 7, 8. У г. Владивостока почва каменистая, то формула (5.3) дает большую погрешность расчета, но если в ней  $g$  заменить на  $(g-20)$ , то она работает с достаточной для практики точностью.

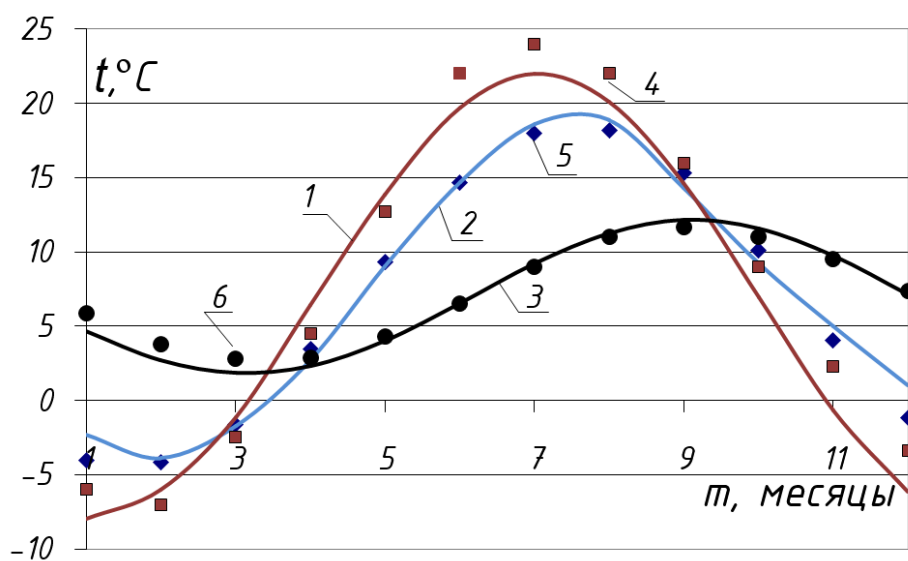


Рисунок 5.3 – Зависимость годового хода температуры на поверхности грунта (кривая 1) и на глубинах 0,8 (кривая 2) и 3,2 м (кривая 3) от времени года и данные метеостанции Павлодарской области, 2008 г. (кривые 4,5 и 6).

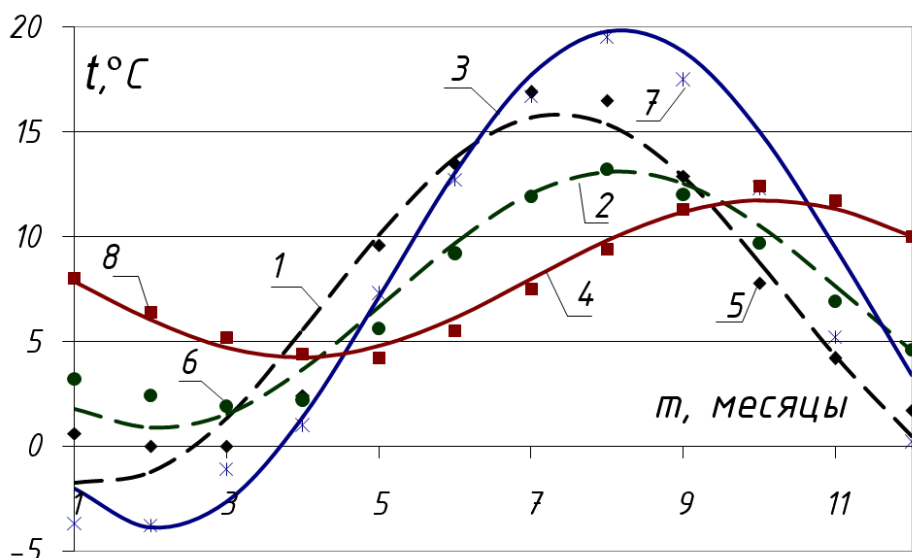


Рисунок 5.4 – Зависимость годового хода температуры на глубинах 0,4 м и 1,6 м для г. Пскова (кривые 1 и 2), на глубинах 0,4 м, 3,2 м для г. Владивостока (кривые 3, 4) и данные метеостанции (кривые 5, 6, 7, 8), взятые из [55].

Вычисленные значения годового хода температур имеют на глубине 10-30 см максимальное расхождение с данными метеостанции перечисленных выше городов не более  $3^{\circ}\text{C}$ , что объясняется влиянием суточных колебаний  $t$ . Как показывают расчеты  $\rho$  по [30] для разных грунтов и температур, ошибка в  $3^{\circ}\text{C}$  приводит к погрешностям при определении  $\rho$ , не превышающим 10%. С увеличением глубины расхождение уменьшается, а на глубине 7 м эта величина уже составляет не более  $0,8^{\circ}\text{C}$ .

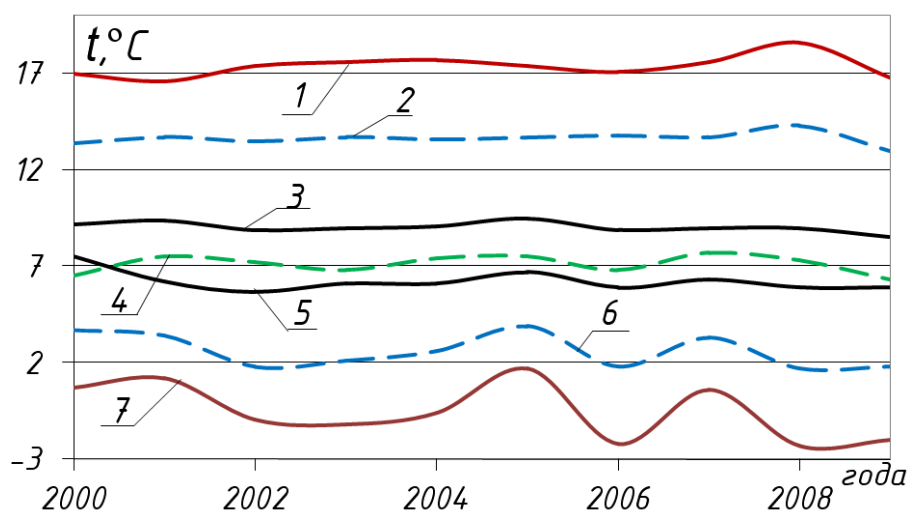


Рисунок 5.5 – Изменения  $t$  за 2000-2009 гг.

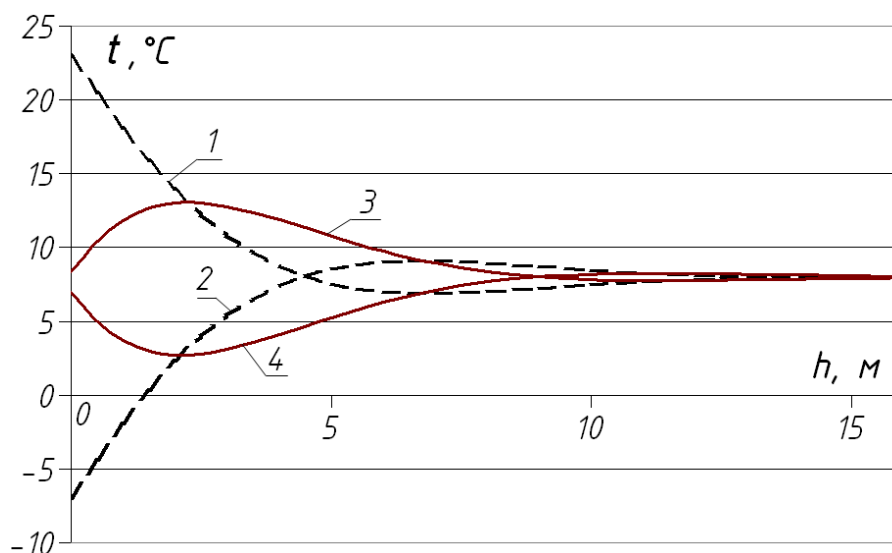


Рисунок 5.6 – Зависимость  $t$  (кривые 1, 2, 3 и 4) от глубины грунта в июле, январе, апреле и октябре.

Но формулы (5.2) и (5.3) не работают на территории вечной мерзлоты, где даже летом почва не оттаивает полностью (проверено на г. Якутске).

Из изложенного следует, что разработанный метод позволяет еще на стадии проектирования достаточно просто определять  $t$  грунта на различной глубине и в любой период года. Для данной местности нужно знать только  $t_{Пmax}$  и  $t_{Пmin}$  поверхности грунта за год. Эту информацию можно получить в метеостанции. Однако формула (5.3) не учитывает суточные колебания  $t$ , вид грунта и его влажность, что, как показывает дальнейший анализ, увеличивает погрешности определения  $t$  на  $5 \div 10\%$ .

На рисунке 5.5 представлены среднегодовая температура  $t_{П}$  поверхности грунта (кривая 4), среднемесячная  $t$  грунта в июле и в январе месяце на глубинах 0,8 м (кривые 1 и 7, соответственно), 1,6 м (кривые 2 и 6) и 3,2 м (кривые 3 и 5) за 2000-2009 гг. На рисунке 5.6 показаны зависимости изменения  $t$  по глубине, рассчитанные по (5.2) для июля, января, апреля и октября месяца (кривые 1, 2, 3 и 4, соответственно). Анализ информации, представленной на рисунках показывает, что температура верхних слоев грунта сильно изменяется, а в глубоких почти постоянна и стремится к среднему значению  $t_{П}$ .

Таким образом, формула (5.3) дает возможность на стадии проектирования заземлителей определить температуру грунта по данным метеостанций с погрешностью не более 4÷15% в любое время года на глубине до 15 м в средних и до 10 м в южных широтах.

### 5.3 Определение теплофизических характеристик грунта для расчета его температуры

Метод определения температуры грунта, учитывающий суточные колебания температуры, вид грунта и его влажность, строится на основе использования нечеткой логики аналогично тому, как это сделано в [30].

Для определения  $t$  используется известная формула [63]:

$$T = \lambda \frac{t_2 - t_1}{h_2 - h_1} \tau = cK \frac{t_2 - t_1}{h_2 - h_1} \tau, \quad (5.4)$$

где  $T$  – тепловой поток в кал/см<sup>2</sup> вглубь грунта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $t_2, t_1$  – температуры грунта в градусах для глубин  $h_2, h_1$  в см;  $\tau$  – интервал времени в сек, за который  $t$  изменяется от  $t_2$  до  $t_1$ ;  $c$  – объемная теплоемкость, кал/см<sup>3</sup> град,  $K$  – коэффициент температуропроводности, см<sup>2</sup>/сек.

Для определения количества тепла (кал/см<sup>2</sup>), поглощенного при нагревании или выделении при охлаждении определенным слоем грунта толщиной  $h_2 - h_1$ , мы использовали следующую формулу [63]:

$$\Delta T = c \cdot (h_2 - h_1) \cdot (t_2 - t_1), \quad (5.5)$$

где  $\Delta T$  и  $(t_2 - t_1)$  – приращение тепла и разность температур в среднем для всего слоя за определенный отрезок времени.

По формуле (5.4) рассчитывали количество тепла, идущее на нагревание верхних слоев грунта,  $t$  которых измеряется. Количество тепла, расходуемое на нагревание более глубоких слоев, для которых нет температурных данных, определяли на верхней границе слоя при помощи формулы (5.5). Затем из  $T_{общ} = T + \Delta T = ch(t_2 - t_1)$  находили искомую  $t$  на нужной глубине  $h$ .



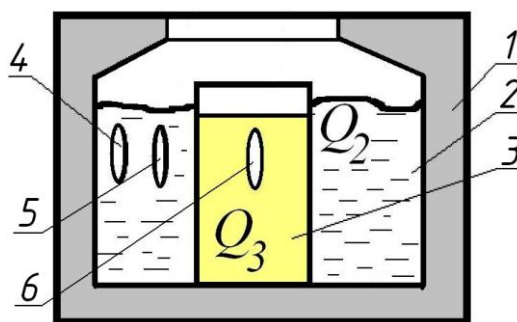


Рисунок 5.7 – Калориметр

Для того, чтобы произвести расчеты по формуле (5.4) нужно было определить следующие величины  $c$  и  $K$ . Так как последние зависят в основном от влажности, плотности и вида грунта, используем данные, полученные нами в результате экспериментов с помощью калориметра [64], представленного на рисунке 5.7. Калориметр состоит из сосуда 1 с водой 2, в котором находятся: камера 3 (капсула) сначала с водой, а потом с грунтом, нагреватель 4 (кипятильник), термометры 5 и 6. Температура измеряется через равные промежутки времени, что позволяет определить количество теплоты, введенное в калориметр. Нагрев в капсуле фиксируется термометром 6, а изменение температуры в калориметре термометром 5.

При определении теплоемкости  $c$  используется общеизвестная формула:  $c = Q_{гр} / (m_{гр} \cdot \Delta t)$ , где  $m_{гр}$  - масса, кг;  $Q_{гр}$  - теплота, поглощаемая грунтом. Для определения теплоемкости  $c_k$  калориметра, учета теплотерь и теплоемкости  $c_{гр}$  грунта используется уравнение теплового баланса  $Q_2 = Q_3$ , где  $Q_2$  - теплота, выделяемая водой в калориметре,  $Q_3$  - теплота, воспринимаемая капсулой (грунтом), индексы 2 и 3 соответствуют обозначениям воды и капсулы на рисунке 5.7. Они определяются по следующим формулам, записанным на основе элементарных понятий физики [64]:

$$Q_2 = m_2 \cdot \Delta t_2 \cdot c_k + V_{nt} \cdot \tau, \quad Q_3 = m_{3a} \cdot \Delta t_3 \cdot c_a + m_{3б(гр)} \cdot \Delta t_3 \cdot c_{б(гр)},$$

где  $c_k$  - теплоемкость калориметра, кал/см<sup>3</sup>·град;  $m_2$  - масса воды в калориметре, кг;  $V_{nt}$  - скорость теплотерь калориметра, кал/сек;  $\tau$  - промежуток времени, через который проводится измерение  $t$ , сек;  $m_{3a}$  - масса капсулы, кг;  $c_a$  -

теплоемкость капсулы, кал/см<sup>3</sup>·град;  $c_{в(зр)}$  – теплоемкость воды (грунта), кал/см<sup>3</sup>·град;  $m_{зв(зр)}$  – масса воды (грунта) в капсуле, кг;  $\Delta t_2 = t_{22} - t_{21}$  и  $\Delta t_3 = t_{32} - t_{31}$ , где  $t_{22}, t_{21}$  и  $t_{32}, t_{31}$  – температуры (°С) в калориметре и в капсуле в разные моменты времени.

Эксперименты проводились в следующей последовательности.

1. Калориметр наполнялся водой для определения скорости

$V_{нт}$  его теплопотерь, причем:  $V_{нт} = \frac{m_2 \cdot \Delta t_2 \cdot c_в}{\tau}$ .

2. Для определения теплоемкости  $c_k$  калориметра сначала в него и в капсулу заливалась вода. Температура воды в калориметре нагревалась до 95°С, затем туда помещалась капсула,  $t$  воды в которой 25°С. Показания термометров регистрировались через каждые две минуты. Из уравнения теплового баланса  $Q_2=Q_3$  вычислялась  $c_k$ :

$$c_k = \frac{m_{3a} \Delta t_3 c_a + m_{зв} \Delta t_3 c_в - V_{нт} \tau}{m_2 \Delta t_2}.$$

3. Для определения теплоемкости  $c_{зр}$  грунта в капсулу засыпался грунт (песок, супесь, глина) определенной массы и  $v$ . Затем она помещалась в калориметр с водой, нагретой до 95°С. Измерялась  $t$  воды в калориметре и  $t$  грунта через каждые две минуты. Эти данные заносились в таблицу. Из уравнения теплового баланса  $Q_2=Q_3$  находилась  $c_{зр}$ :

$$c_{зр} = \frac{m_2 \Delta t_2 c_k - m_a \Delta t_3 c_a + V_{нт} \tau}{m_{зр} \Delta t_3}.$$

4. Затем из (5.4) определялась  $K$ :

$$K = \frac{T(h_2 - h_1)}{c_{зр} \tau (t_2 - t_1)} = \frac{Q_3 (h_2 - h_1)}{S_{зр} c_{зр} \tau (t_2 - t_1)},$$

где  $S_{зр}$  - площадь поверхности грунта в капсуле, см<sup>2</sup>;  $(h_2 - h_1)$  - её радиус, см.

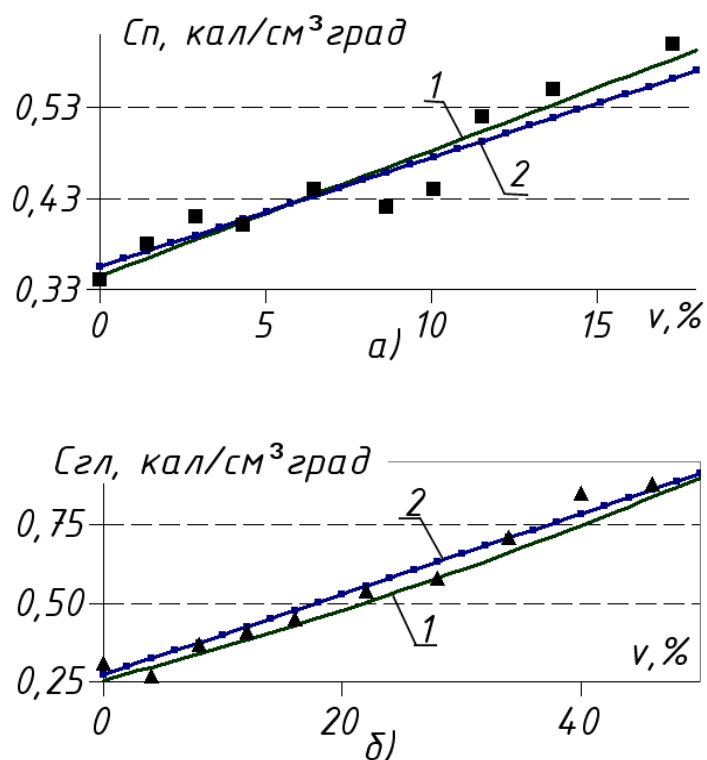


Рисунок 5.8 – Зависимости теплоемкости от влажности:  
а)-песка, б)- глины.

Зависимости теплоемкости  $c$  от влажности  $v$  найдены на основе наших экспериментальных данных с помощью регрессионного моделирования. Ниже приведены эти зависимости для песка, супеси и глины:

$$c_n = (0,014 \cdot v + 0,345); \quad c_c = (0,016 \cdot v + 0,31); \quad c_{гл} = (0,013 \cdot v + 0,27) \quad (5.6)$$

Для сравнения на рисунке 5.8,а и 5.8,б представлены зависимости теплоемкости песка и глины от  $v$ , где кривые 1 построены по данным, взятым из [63], а прямые 2 – по (5.6).

$K$  представляет для нас особый интерес, так как он определяет распределение  $t$  в грунте по глубине.  $K$  зависит от  $v$  грунта, но зависимость эта сложная, так как влажность грунта увеличивает не только его теплопроводность, но и теплоемкость. Определение зависимости  $K$  от  $v$  выполняем с помощью нечеткой логики [32] и экспериментальных данных, полученных нами с помощью калориметра. Нечетко определяется интервал значения «влажность». Для получения общего уравнения моделирования  $K$  необходим переход к относительным значениям влажности, так как каждый вид грунта имеет свой предел насыщения водой (песок – 17-18%,

глина до 50%). Поэтому влажность далее взята в процентах от максимальной влагоемкости. Как и в [30], используется два термина: первый «сухо» с ФП  $\mu_1(v)$ , второй «влажно» с  $\mu_2(v)$ . Для построения ФП из числа стандартных выбираются Z- и S-функции. Соответственно будет два интервала: первый  $0 \leq v < 35\%$ , второй  $65 \leq v < 100\%$  и область переключения между интервалами:  $35 \leq v \leq 65\%$ . Формулу для определения  $K$  запишем в соответствии с правилами, изложенными в [32]:

$$K = \sum_{i=1}^2 \eta_i(v) \cdot \mu_i(v) \quad (5.7)$$

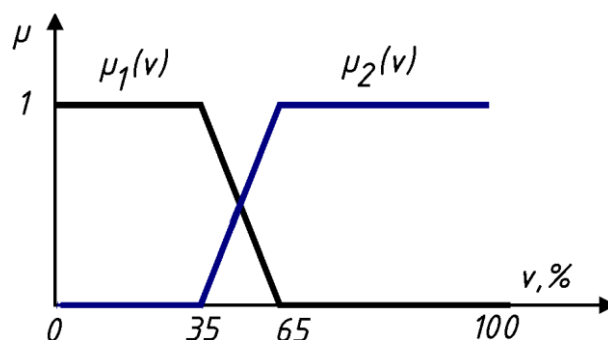


Рисунок 5.9 – Семейство ФП для определения  $K$

Функции  $\eta_i(v)$  определяются так:  $\eta_i(v) = b_0 + b_1 \cdot v$ , где  $b_0$  и  $b_1$  – параметры уравнения прямой, оцениваемые по методу наименьших квадратов для каждого из интервалов отдельно. Функции  $\mu_1(v)$  и  $\mu_2(v)$  принадлежности для тех же интервалов представлены на рисунке 5.9 и имеют вид:

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, & 0 \leq v < 35 \\ \frac{v-35}{30}, & 35 \leq v < 65 \\ 0, & v \geq 65 \end{cases}, \quad \mu_2 = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < 35 \\ 1 - \frac{v-35}{30}, & 35 \leq v < 65 \\ 1, & v \geq 65 \end{cases}. \quad (5.8)$$

Из (5.7) и (5.8) получены следующие зависимости  $K$  от  $v$  для песка, супеси и глины,  $10^{-3} \text{ см}^2/\text{сек}$  [65], имеющие вид:

$$\begin{aligned} K_n &= (0,19 \cdot v + 0,74) \cdot \mu_1(v) + (-0,044 \cdot v + 3,6) \cdot \mu_2(v); \\ K_c &= (0,525 \cdot v - 0,94) \cdot \mu_1(v) + (-0,18 \cdot v + 6) \cdot \mu_2(v); \\ K_{г} &= (0,325 \cdot v + 0,1) \cdot \mu_1(v) + (-0,325 \cdot v + 16) \cdot \mu_2(v). \end{aligned} \quad (5.9)$$

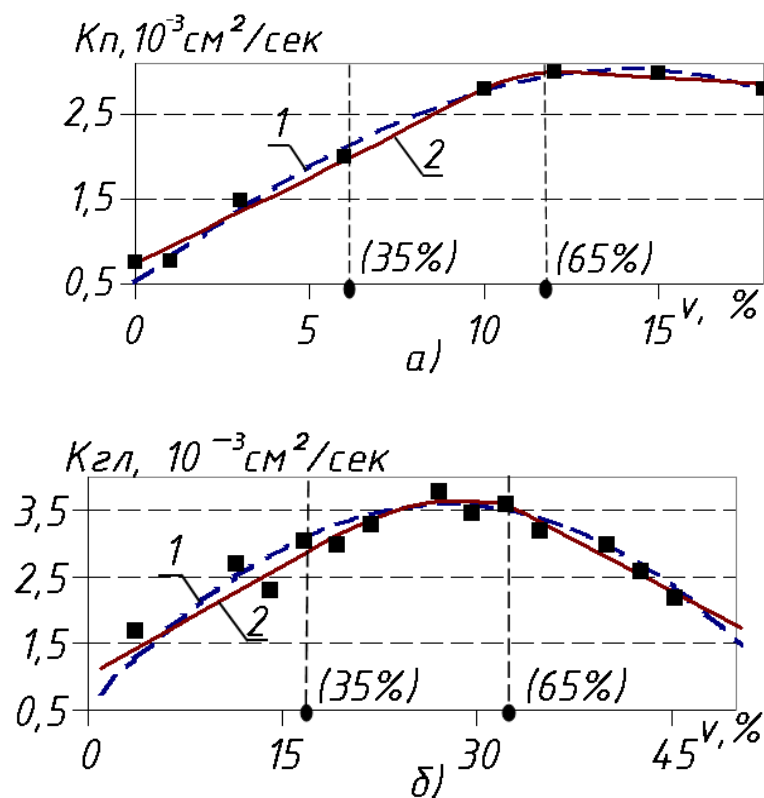


Рисунок 5.10 – Изменение температуропроводности в зависимости от влажности: а)-песка, б)- глины

На рисунке 5.10, а и 5.10, б представлены зависимости  $K = f(v)$  для песка и глины, где кривые 1 построены по нашим экспериментальным данным, а кривые 2 - по (5.9). В скобках указаны цифры для упрощения понимания и согласования с рисунком 5.9.

**Примеры расчета температуры  $t$  и удельного электрического сопротивления  $\rho$  грунта [62] для заземлителя на ТЭЦ в г. Павлодаре. Заземлитель находится на глубине 1 м, грунт – песок с влажностью  $v = 5\%$ .**

По первому методу вычисляли  $t$  на глубине 1 м. В расчетах использованы данные по Павлодарской области (см. рисунок 5.3). В июле месяце на поверхности грунта средняя температура  $t = 24^\circ\text{C}$ . Годовая амплитуда  $A_{п}$  температуры поверхности грунта равна  $15^\circ\text{C}$ . Амплитуда колебания температур на глубине 1 м  $A_{г} = 10,7^\circ\text{C}$  получена из (5.2), тогда по формуле (5.3)  $t = 17,5^\circ\text{C}$  при  $t_{г} = 8^\circ\text{C}$  на данной глубине в июле. Удельное электрическое сопротивление грунта рассчитывалось [30] по формуле (3.13) для нечеткого интервала «влажно», где  $\mu_{A_1}(v) = 0$  и  $\mu_{A_2}(v) = 1$  - функции принадлежности,

0,8 и 2 коэффициенты, определяющие степень нечеткости и положение на числовой оси параметра, то есть влажности [30].

Подставляя в (3.13)  $\nu=5\%$  и в (1.14)  $t=17,5^{\circ}\text{C}$ , получили:  $\rho=0,873 \text{ кОм}\cdot\text{м}$ .

По второму методу измеряли температуру  $t_2=24^{\circ}\text{C}$  на поверхности ( $h_2=0\text{см}$ ) грунта и  $t_1=18^{\circ}\text{C}$  на глубине  $h_1=20\text{см}$ . Затем на той же глубине через час замерялась  $t_3=20^{\circ}\text{C}$ .

По (5.6) находили теплоемкость песка:  $c_n=0,42 \text{ кал/см}^3\cdot\text{град}$ , по (5.9) – температуропроводность при той же влажности ( $\mu_1=1$  и  $\mu_2=0$ ):  $K_n=1,7\cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{сек}$ . Определяли значения  $T$  и  $\Delta T$  по (5.4) и (5.5):

$$T = c_n K_n \frac{t_2 - t_1}{h_2 - h_1} \tau = 0,42 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} \frac{(24 - 18)}{(20 - 0)} \cdot 3600 = 0,8 \text{ кал/см}^2;$$

$$\Delta T = c_n (h_2 - h_1) (t_2 - t_3) = 0,42 \cdot (20 - 0) \cdot (24 - 20) = 33,6 \text{ кал/см}^2.$$

Из (5.5) можно рассчитать искомую температуру грунта  $t$  на глубине 100см:

$$t = t_1 - (T + \Delta T) / (c_n h) = 18 - (0,8 + 33,6) / (0,42 \cdot 100) = 17^{\circ}\text{C},$$

где  $(T + \Delta T)$  - тепло, необходимое для прогревания грунта до 1м.  $\rho$  песка при  $t=17^{\circ}\text{C}$  и  $\nu=5\%$  находится по (4.5):  $\rho_{\text{песка}}=0,88 \text{ кОм}\cdot\text{м}$ .

### **Сравнение погрешностей расчетов $t$ и $\rho$ по обоим методам**

По данным метеостанции г. Павлодара на глубине один метр среднемесячная  $t$  грунта в июле месяце равна  $16,5^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, в приведенном примере погрешность определения  $t$  на данной глубине по первому методу составляет 6% , по второму - 3%, а удельное электрическое сопротивление  $\rho$  ( $0,893 \text{ кОм}\cdot\text{м}$  при  $t=16,5^{\circ}\text{C}$ ) – по первому 2,2% и по второму -1,5%, соответственно. Однако расчеты показали, что на глубинах более 1 метра второй метод работает хуже, чем первый. Например, на глубине 2м по первому методу  $t=13,8^{\circ}\text{C}$ , по второму –  $t=17,5^{\circ}\text{C}$ , а по данным метеостанции г. Павлодара среднемесячная  $t = 13^{\circ}\text{C}$ . Если не учитывать изменение  $t$  вглубь грунта по первому методу, беря во внимание лишь  $t$  на его поверхности, то при  $t=24^{\circ}\text{C}$  по формуле (3.13) имеем:  $\rho_{\text{песка}}=0,756 \text{ (кОм}\cdot\text{м)}$ , и разница в расчетах  $\rho$  составит уже 15%.

Разработанный метод определения теплофизических характеристик грунта позволяет рассчитать его температуру по известным формулам (5.4) и (5.5) с погрешностью менее 10% на глубинах до 1 м.

### Определение суточных колебаний температуры

Известны формулы [57] расчета суточных изменений температуры, но их применение связано со сложным определением теплопроводности грунта. С использованием методик [51, 62], описанных выше, эта задача становится легко выполнимой. Для ее решения необходимо выполнение следующих действий:

- определения вида грунта и мощности его слоев в районе определения суточных колебаний температуры на требуемых глубинах;
- определение влажности грунтов на этих глубинах;
- расчет коэффициента теплопроводности для каждого грунта;
- определение амплитуды суточных колебаний температуры  $A_h$  на интересующей исследователя глубине по  $h$  формуле:

$$A_h = A_{\Pi} e^{-3.16 \cdot 10^{-4} h \sqrt{\frac{\pi}{T_K \cdot K}}},$$

где  $A_{\Pi}$  – амплитуда колебаний температуры поверхности грунта;  $A_h$  – амплитуда колебаний температуры на глубине;  $T_K$  – период колебаний = 1 (сутки);  $K$  – коэффициент теплопроводности;

**Температуру грунта** для определенной глубины и времени года можно найти по формуле [57], полученной на основе использования теории теплопроводности Фурье и данных метеостанции:

$$t = t_{\Pi} - A_{\Pi} e^{-3.16 \cdot 10^{-4} h \sqrt{\pi/365K}} \cos\left(\frac{2\pi}{365} \left[ -171 - 1.834 \cdot 10^{-2} \cdot h \sqrt{365/\pi \cdot K} \right] \right), \quad (5.10)$$

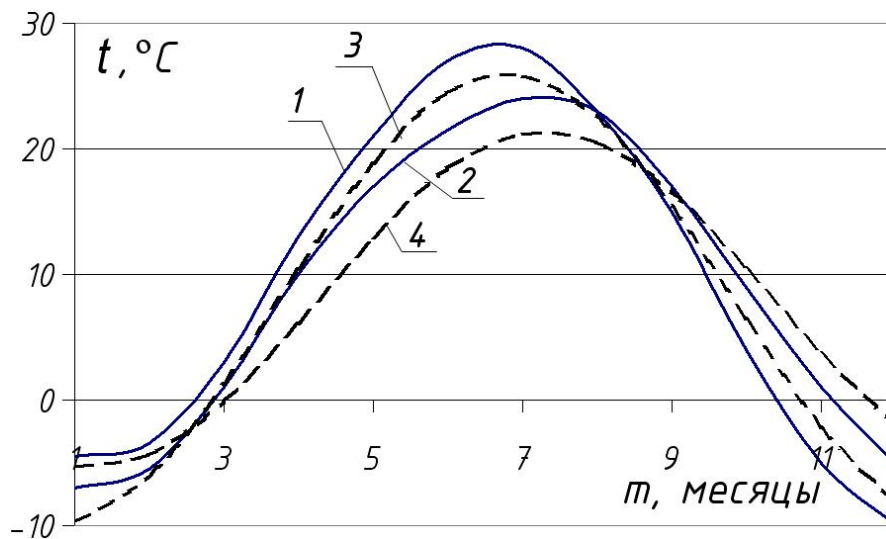


Рисунок 5.11 – Годовой ход температуры Киева по (5.10) на глубине 0,8 м и 1,6 м (кривые 1 и 2) и по методу (кривые 3 и 4), представленному в разделе §5.2.

где  $t_{II}$  – температура «слоя постоянной  $t$ », °C, она близка к средней годовой  $t$  поверхности грунта, например для средних широт  $t_{II} \approx 8^{\circ}\text{C}$  [55];  $A_{II}$  – амплитуда колебания  $t$  поверхности грунта (относительно слоя постоянной годовой  $t$ ) на требуемой глубине, °C;  $h$  – глубина, м;  $K$  – коэффициент температуропроводности грунта,  $\text{см}^2/\text{сек}$ ;  $g$  – дни (количество суток). В (5.10) используются данные метеостанции ( $t_{II}$ ,  $A_{II}$ ) и  $K$  грунта. Последняя изменяется в зависимости от влажности, например для песка  $K=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{сек}$  при  $v=0\%$ , а при  $v=10\%$   $K=3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{сек}$ , что делает данный расчет трудоемким.

Таким образом, формула (5.10) позволяет определять температуру грунта с погрешностью до 15%, но она требует для расчета знания коэффициента температуропроводности  $K$  грунта.

### Выводы

1. Предложенная зависимость температуры грунта от его глубины и времени года позволяет определять ее с погрешностью 4-15%, однако, не учитывает влияние влажности и использует только данные метеостанций (до 15 м в средних широтах и до 10 м в южных), но без применения коэффициента температуропроводности  $K$ .



2. Полученные зависимости теплоемкости и температуропроводности грунта от влажности дают возможность по известным формулам (5.4)-(5.5) рассчитывать температуру грунта глубиной до 1 м с погрешностью до 10%. При разработке зависимостей впервые использована теория нечетких множеств

3. Разработанные методы позволяют, не делая трудоемких измерений, определять температуру грунта на глубине заземлителей.

#### **5.4 Вопросы для проверки остаточных знаний**

1. Какова зависимость удельного электрического сопротивления грунта от его температуры?

2. В чем суть теории молекулярной теплопроводности Фурье?

3. Какие данные необходимы для расчета температуры по (5.3)?

4. Назовите теплофизические характеристики грунта?

5. Как определяется коэффициент температуропроводности, и от чего он зависит?

6. Для чего нужен калориметр? Назовите его составные части.

## 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ГРУНТА

### 6.1 Существующие методы определения плотности грунта

Степень уплотненности грунта (плотность взаимного прилегания частиц) оказывает непосредственное влияние на его удельное сопротивление  $\rho$  наряду с влажностью и температурой. При проектировании устройств заземлений необходимо учитывать и плотность  $d_{zp}$  грунта, так как в конечном итоге это может дать реальную экономию металла. Твердостью (плотностью) почвы [66] называется способность ее оказывать сопротивление проникновению в нее твердых режущих тел под давлением. Ее в поле обычно устанавливают визуально, различая следующие степени плотности почвы: а) рыхлая – осыпается со стенок разреза от прикосновения ножа, легко проникающего в почву; б) рыхловатая – осыпается меньше предыдущей, почвенный разрез без затруднения копается лопатой, нож хорошо проникает в почву; в) уплотненная (плотноватая) – удовлетворительно режется лопатой и ножом, нож с трудом входит в почву; г) твердая – с трудом режется лопатой; стенки разреза очень плотные, нож с трудом входит в почву; д) очень твердая – слабо поддается действию лопаты. Нож лишь оставляет черту, не проникая в почву. Хорошо поддаются трамбовке глина, например, разрыхляющаяся на 10–30%; а плохо – песок, у которого способность к разрыхлению составляет всего 5–15%.

Плотность грунта определяют двумя методами: методом режущего кольца и методом взвешивания в воде [67].

Первый метод определяется отношением массы образца грунта к его объему. Верхнюю зачищенную плоскость образца грунта выравнивают, срезая излишки грунта ножом, устанавливают на ней режущий край кольца и винтовым прессом или вручную через насадку слегка вдавливают кольцо в грунт, фиксируя границу образца для испытаний. Затем грунт снаружи кольца обрезают на глубину 5-10 мм ниже режущего края кольца, формируя столбик диаметром на 1-2 мм больше наружного диаметра кольца. Периодически, по мере срезания грунта, легким нажимом пресса или насадки насаживают кольцо на столбик грунта, не допуская перекосов. После

заполнения кольца грунт подрезают на 8-10 мм ниже режущего края кольца и отделяют его. Грунт, выступающий за края кольца, срезают ножом, зачищают поверхность грунта вровень с краями кольца и закрывают торцы пластинками. Кольцо с грунтом и пластинками взвешивают.

Плотность грунта ( $\text{г/см}^3$ ) вычисляют по формуле

$$P = (m_1 - m_0 - m_2) / V,$$

где  $m_1$  - масса грунта с кольцом и пластинками, г;  $m_0$  - масса кольца, г;  $m_2$  - масса пластинок, г;  $V$  - внутренний объем кольца,  $\text{см}^3$ .

Определение плотности грунта методом взвешивания в воде

Вырезают образец грунта объемом не менее  $50 \text{ см}^3$  и придают ему округлую форму, срезая острые выступающие части, обвязывают его тонкой прочной нитью со свободным концом длиной 15-20 см, имеющим петлю для подвешивания к серьге весов, взвешивают его. Образец грунта покрывают парафиновой оболочкой и взвешивают. Парафинированный образец взвешивают в сосуде с водой и без воды для проверки герметичности оболочки. Если масса образца увеличилась более чем на 0,02 г по сравнению с первоначальной, образец следует забраковать и повторить испытание с другим образцом.

Плотность грунта ( $\text{г/см}^3$ ) вычисляют по формуле

$$P = \frac{m \cdot P_v \cdot P_{II}}{P_{II}(m_1 - m_2) - P_v(m_1 - m)},$$

где  $m$  - масса образца грунта до парафинирования, г;  $m_1$  - масса парафинированного образца грунта, г;  $m_2$  - результат взвешивания образца в воде (разность масс парафинированного образца и вытесненной им воды), г;  $P_{II}$  - плотность парафина, принимаемая равной  $0,900 \text{ г/см}^3$ ;  $P_v$  - плотность воды при температуре испытаний,  $\text{г/см}^3$ .

## 6.2 Экспериментальные исследования плотности

В данной главе предпринята попытка определения зависимости  $\rho$  от  $d_{zp}$  грунта для трех видов почв (песок, супесь и суглинок).

Степень уплотненности  $d_{zp}$  грунта оказывает непосредственное влияние на его  $\rho$  наряду с  $v$  и  $t$ . Утверждение [14], что, чем плотнее утрамбован грунт, тем

меньше его удельное электрическое сопротивление, понятно по физической сути и общепринято. Однако характер зависимостей  $\rho$  грунта от его плотности для песка, супеси и суглинка, насколько нам известно, был изучен недостаточно.

Для решения данной задачи была разработана и смонтирована установка, позволяющая обеспечить необходимое уплотнение образцов конкретного вида грунта и измерять электропроводность грунта при различной степени его плотности.

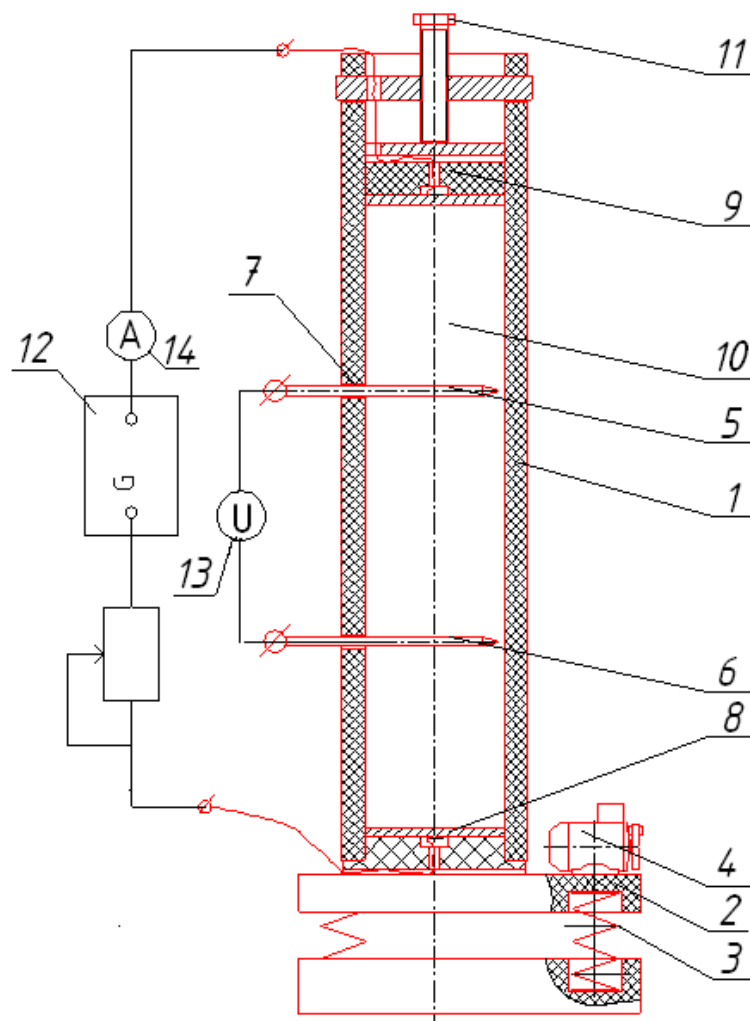


Рисунок 6.1 – Установка для определения электропроводности грунтов

*Экспериментальная установка* [68] позволяет обеспечить уплотнение образцов конкретного вида грунта от переложенного до плотности естественного залегания. Чертеж установки показан на рисунке 6.1. Установка состоит из трубы 1, закрепленной вертикально на раме 2, установленной на

упругих опорах 3, с возбудителем колебаний 4, двух внутренних электродов 5 и 6, размещенных в двух радиальных отверстиях, выполненных в средней части трубы, с уплотнением 7. Нижний внешний электрод 8 установлен неподвижно внизу трубы, а верхний внешний 9 – вверху трубы, с возможностью прижима к образцу грунта 10, помещенного в трубе, например винтом 11. Внешние электроды присоединены к источнику питания 12, к полюсам вольтметра 14, а внутренние – к вольтметру 13.

Эксперименты проводились следующим образом:

1) в трубу с сечением  $S_T$  и длиной  $\ell_T$  загружался образец грунта известного веса  $p_{gp}$ , влажности  $v$  и температуры  $t$ ;

2) он подвергался виброобработке для достижения некоторой его уплотненности;

3) на внешние электроды подавалось заданное падение напряжения, а на внутренних электродах измерялся ток; удельное электрическое сопротивление рассчитывали по  $\rho = (U \cdot S_T) / (I \cdot \ell_T)$ ;

4) плотность  $d_{gp}$  определялась по известной формуле:  $d_{gp} = p_{gp} / (S_T \cdot \ell_T)$ .

**Экспериментальные данные.** В результате экспериментов были получены данные для трех грунтов: песок, супесь и суглинки при разной степени увлажненности.

В [14] утверждается: чем выше  $d$ , т.е. чем лучше утрамбован грунт, тем меньше его  $\rho$ . Это подтверждают и наши эксперименты (рис. 5), причем для песка с влажностью более 1% характер изменения  $\rho$  от плотности экспоненциальный (кривые 1-3). Во влажном состоянии  $\rho$  песка имеет значение 40 Ом·м, в сухом же состоянии оно может достигать до 10 кОм·м, т.е. чем влажнее грунт, тем меньше  $\rho$ .

Для песчаных грунтов в сухом состоянии (от 0% до 1%) сначала при уплотнении наблюдается уменьшение  $\rho$  по экспоненте примерно до 1,6 кг/дм<sup>3</sup>, затем в отличие от [14] наблюдается его линейный рост (рис. 6.2, кривая 4). Для супеси и суглинка такой картины не удалось получить, ввиду того, что в реальных условиях они не имеют влажности менее 1,5% и 1% соответственно, т.к. обладают высокой гигроскопичностью. Это еще раз говорит о том, что надо следовать рекомендациям [14], тщательно трамбовать грунт.

## Результаты экспериментов

На основании экспериментальных исследований получена следующая зависимость  $\rho$  песка, супеси и суглинка от плотности:

$$\rho = \rho_{d_0} \cdot e^{k_v(d-d_0)} \quad (6.1)$$

где  $\rho_{d_0}$  и  $d_0$  – удельное электрическое сопротивление и плотность грунта, взятые по данным геологоразведки, которые берутся перед проектированием ЗУ либо  $\rho_{d_0}$  можно вычислить по [30] с соответствующей  $d_0$  (например, для песка  $d_0 \approx 1,4 \text{ кг/м}^3$ ),  $k_v$  – коэффициент, для суглинка  $k_v = e^{(-0.46 \cdot v + 2.05)} - 5$ , для песка  $k_v = -e^{(-0.08 \cdot v + 1.08)}$  и для супеси  $k_v = -e^{(-0.05 \cdot v + 1.1)}$ .

Для влажных супеси и суглинка от 1% до состояния водонасыщения  $\rho$  уменьшается с ростом плотности. Причем, зависимость эта, как и предыдущие, имеет экспоненциальный характер (рис. 6.2). На рисунке 6.3 для супеси (кривые 1,2 и 3) соответствует левая шкала значений  $\rho$ , для суглинка – правая. Для суглинков и глин во влажном состоянии характерно явление слипания частиц. Это приводит к образованию многочисленных пустот и трещин, что уменьшает проводимость грунта. Поэтому при организации устройств заземления необходимо учитывать эту особенность. На нашей лабораторной установке удалось получить примерно однородную по плотности структуру для суглинка с влажностью менее 10%.

Известно, что зачастую после установки устройств заземления его параметры бывают хуже расчетных, несмотря на тщательное соблюдение технологии проведения строительных работ. Возникает вопрос: что делать? Поливать солевым раствором, вводить новые заземления и т.п. Для решения этой задачи можно использовать зависимость (6.1), дающую возможность определять динамику уменьшения  $\rho$  грунта в процессе его уплотнения от состояния разрыхления до полного оседания. Для этого  $\rho$  рассчитывается по [30] в зависимости от температуры и влажности. Берется  $d_0$  с некоторым уплотнением по рисункам 6.2, 6.3 с соответствующей влажностью, и затем по (6.1) определяем  $\rho$  грунта с учетом его плотности. Существуют данные по

оседанию грунтов [52], которые определяют временные интервалы перехода грунта к состоянию естественного залегания. Например, при планомерно возведенном сооружении заземления с применением тщательной трамбовки для глинистых грунтов требуется от 2 до 5 лет, для песчаных грунтов 1-2 года, а без уплотнения – от 10 до 15 и 2-5 лет соответственно. Чтобы уточнить дополнительные меры по улучшению параметров ЗУ, полученные зависимости (рис. 6.2 и рис. 6.3) могут быть разделены на соответствующие периоды (2-5 лет и 1-2) для расчета  $\rho$  грунта во времени.

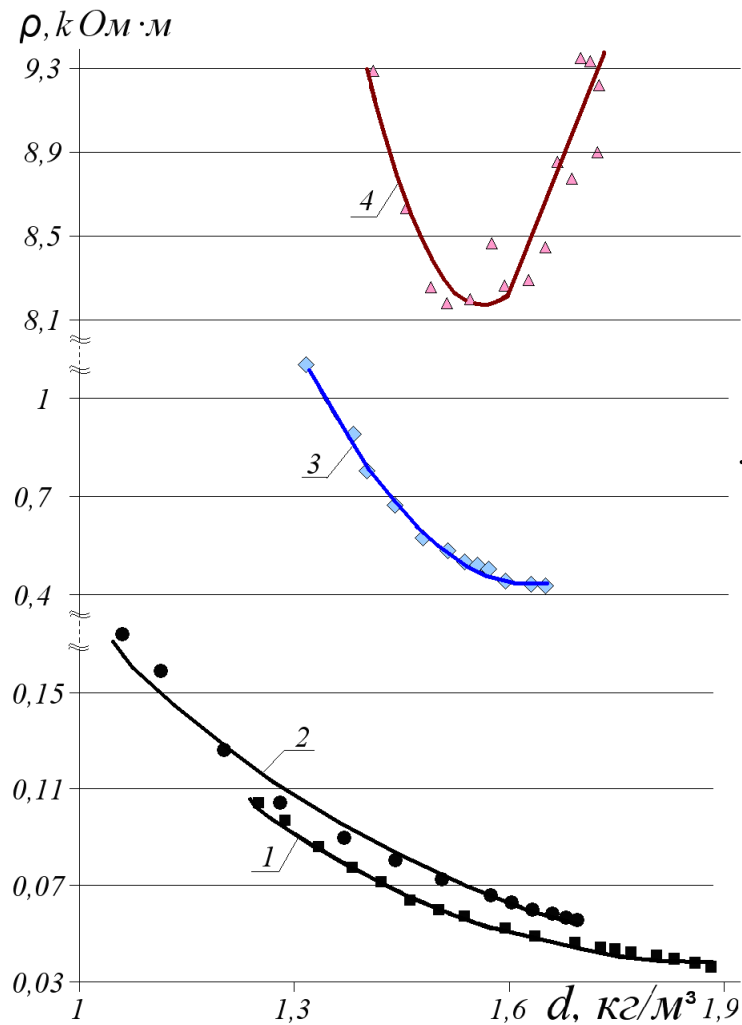


Рисунок 6.2 – Зависимости  $\rho$  от плотности для песка влажностью 9% (кривая 1), 5% (кривая 2), 1% (кривая 3) и 0% (кривая 4)

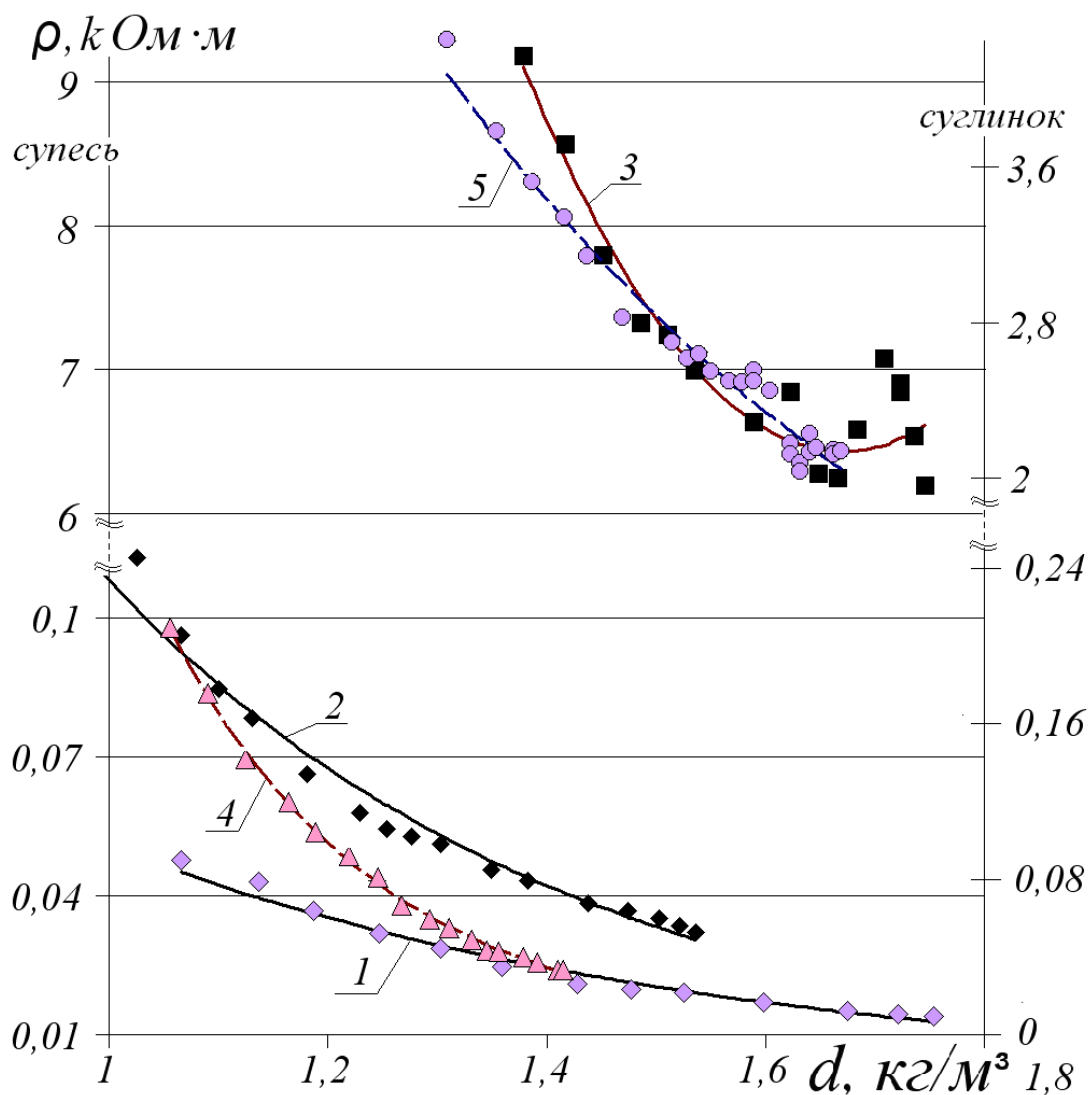


Рисунок 6.3 - Зависимость  $\rho$  от плотности для супеси влажностью 9% (кривая 1), 5% (кривая 2) и 1% (кривая 3) и суглинка влажностью 7% (кривая 4) и 2% (кривая 5).

При увлажнении грунта влага заполняет поровое пространство между частицами, таким образом, увеличивая его плотность. Эти зависимости для песка, супеси и суглинка показаны на рисунке 6.4 (1– песок, 2– супесь, 3– суглинок), где форма изменения поведения плотности от влажности для песка и супеси практически линейная, а для суглинка носит ярко выраженный нелинейный характер.



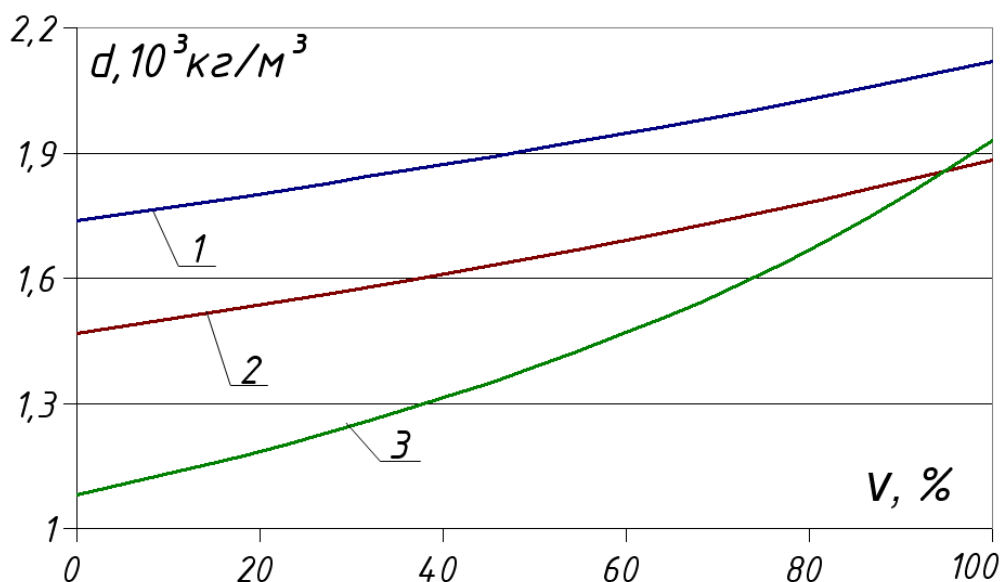


Рисунок 6.4 – Зависимость изменения плотности от влажности (причем, влажность взята в процентах от максимальной ее величины)

Изменение  $d$  под воздействием температуры и влажности оказывает незначительное влияние на  $\rho$  по сравнению с влиянием на удельное электрическое сопротивление как влажности, так и температуры, например, при увлажнении песка с 0 до 10% влажности его плотность увеличивается на  $314 \text{ кг/м}^3$ . При этом  $\rho$  уменьшается с  $9300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  до  $75 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (в 124 раза), а при изменении  $d$  на  $314 \text{ кг/м}^3$   $\rho$  уменьшается на с  $850 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  до  $450 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  для песка с влажностью 1% и с  $75 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  до  $40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  для песка с влажностью 10%, то есть менее, чем в два раза (см. рисунок 6.4). Поэтому изменением плотности при изменении влажности можно пренебречь. Изменение  $d_{sp}$  от температуры для песка и супеси несущественно из-за их кристаллического строения даже при отрицательных температурах, когда происходит кристаллизация влаги. В области отрицательных температур для суглинка и глины наблюдается более заметное увеличение объема при росте влажности.

### Выводы

1. Полученные эмпирические формулы зависимости  $\rho$  грунта от плотности могут быть использованы при прогнозировании его уменьшения после ввода с эксплуатацию сооружений заземления.

2. Полученные экспериментально зависимости удельного электрического сопротивления  $\rho$  от плотности влагосодержащего грунта показали, что  $\rho$  уменьшается по экспоненциальному закону при увеличении плотности.

3. Для сухих песков с ростом плотности  $d_{sp}$   $\rho$  уменьшается, а после уплотнения (когда пустоты исчезают) увеличивается линейно.

### **6.3 Вопросы для проверки знаний**

1. Перечислите степени плотности грунта.
2. Что такое твердость грунта?
3. Опишите методику проведения экспериментов по уплотнению грунтов.
4. Какова зависимость удельного электрического сопротивления грунта от его плотности?
5. Перечислите искусственные способы уменьшения удельного электрического сопротивления грунта.

## 7 ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА, РЕАЛИЗУЮЩАЯ ПРЕДЛОЖЕННЫЕ МЕТОДЫ

Расчет ЗУ грунта осуществляется на базе основных положений электротехники с учетом климатических, гидрогеологических особенностей участка застройки и сводится к определению количества, размеров и схемы размещения заземлителей, при которых напряжения прикосновения и шага в период замыкания фазы на заземленный корпус не превысят допустимых значений.

Основные задачи, стоящие при конструировании и моделировании ЗУ: расчет удельного электрического сопротивления грунта с учетом его многослойности и климатических условий местности, расчет сопротивлений ЗУ. Конструирование ЗУ выполняется путем последовательного приближения основных параметров принятого заземлителя - форма, размеры, схема размещения - к тем, которые в конечном итоге будут способствовать выполнению заземления.

Основным результатом данной работы является программа ZU.exe автоматизированного расчета удельного электрического сопротивления  $\rho$  грунта и сопротивления ЗУ. Главное окно программы представлено на рисунке 7.1. Программа разработана в среде программирования Turbo Delphi.

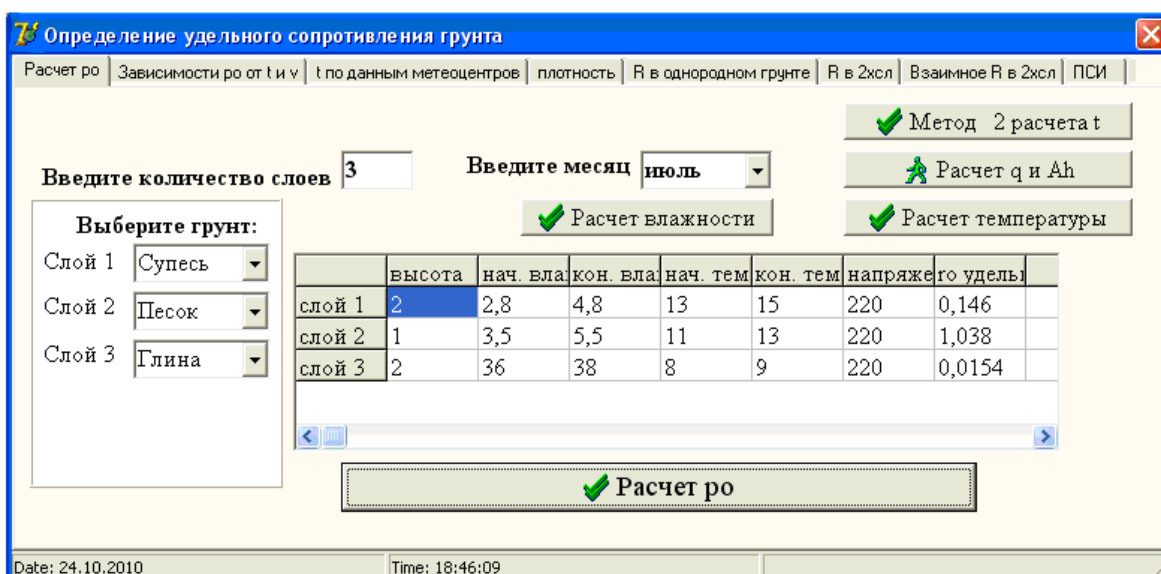


Рисунок 7.1 – Интерфейс окна «Расчет  $\rho$  грунта»

## 7.1 Окончательные формулы расчета удельного электрического сопротивления грунта

Получены формулы для расчета удельного электрического сопротивления песка и глины [30]:

при  $t > 0$

$$\begin{aligned} \rho_n &= (6 \cdot 0,3^v \cdot \mu_1(v) + 1 \cdot 0,7^v \cdot \mu_2(v)) \cdot e^{-0,022(t-20)} \\ \rho_{гп} &= (0,0 \cdot 0,25^v \cdot \mu_1(v) + 3 \cdot 0,8^v \cdot \mu_2(v)) \cdot e^{-0,022(t-20)} \end{aligned} \quad (7.1)$$

при  $t < 0$

$$\rho_n^0 = \rho_n^{t=0} \cdot k_n \cdot 0,87^{(t+1)}, \quad \rho_{гп}^0 = \rho_{гп}^{t=0} \cdot 0,88^{(t+1)}, \quad (7.2)$$

где  $\mu_i(v)$  - функции принадлежности [32];  $\rho^{t=0}$  - удельное сопротивление грунта, рассчитанное по (7.1) при  $t=0^\circ\text{C}$ ;  $k_n$  - коэффициент, учитывающий скачкообразное увеличение  $\rho_{п}$  песка в районе от  $0^\circ\text{C}$  до  $-1^\circ\text{C}$ , т.к. он имеет кристаллическую структуру грунта, равный  $-0,03 \cdot v_{п}^2 + 0,8 \cdot v_{п} - 0,9$ . У глины этого скачка нет и изменение  $\rho_{гп}$  с уменьшением  $t$  происходит плавно, т.к. в увлажненном виде она представляет собой аморфную структуру в отличие от песка.

Влажность грунта определяется по (4.5) для глубин до 1 м или по (4.7) для глубин ниже 1 м. Температура грунта определяется по (5.2) - (5.3) для глубин до 15 м либо по (5.4)-(5.5) для глубин до 1 м. Если рассчитывать  $\rho$  при определенной плотности, то используется формула (6.1).

### Расчет погрешностей.

1) Имеются данные геологоразведки: район Павлодарской области, песок, месяц октябрь, глубина  $h=4\text{м}$ ,  $\rho=2,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $v=19\%$ , уровень грунтовых вод  $h_{ГВ}=4\text{м}$ ,  $d_0=2,13 \text{ г/см}^3$

Температура грунта рассчитывается по (5.3)  $t=12,65^\circ\text{C}$ , влажность по (4.7)  $v=18\%$  (глубина ниже 1 м и  $h_{ГВ}=4\text{м}$ ).  $\rho$  песка по (7.1)  $\rho_{п}=(6 \cdot 0,3^v \cdot \mu_1(v) + 1 \cdot 0,7^v \cdot \mu_2(v)) \cdot \alpha=(6 \cdot 0,3^{18} \cdot 0 + 1 \cdot 0,7^{18} \cdot 1) \cdot e^{-0,022(12,65-20)} = 2,8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Погрешность расчета по влажности 5%, а по  $\rho$  - 15%.

Если необходимо узнать  $\rho$  при плотности  $d=1,4 \text{ г/см}^3$  в разрыхленном состоянии, то

$$\rho = \rho_{п} \cdot e^{k_v(d-d_0)} = 2,8 \cdot e^{-0,7(1,4-2,13)} = 4,8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

2) Имеются данные геологоразведки: район Павлодарской области, супесь, месяц май, глубина  $h=1,1 \text{ м}$ ,  $\rho=141 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $v=5\%$ , уровень грунтовых вод  $h_{ГВ}=3\text{м}$ ,  $d_0=1,76 \text{ г/см}^3$ .

Температура грунта по (5.3)  $t=9,5^{\circ}\text{C}$ , влажность по (4.7)  $v=3,5\%$  (глубина ниже 1м и  $h_{ГВ}=3\text{м}$ ).  $\rho$  супеси по (7.1)  $\rho_c=(90\cdot 0,1^v\cdot \mu_1(v)+0,3\cdot 0,8^v\cdot \mu_2(v))\cdot \alpha=(90\cdot 0,1^{3,5}\cdot 0,17+0,3\cdot 0,8^{3,5}\cdot 0,83)\cdot e^{-0,022\cdot (9,5-20)}=150\text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Погрешность расчета по влажности 30%, а по  $\rho$  – 7%.

Если необходимо узнать  $\rho$  при большей плотности, например  $d=1,9\text{ г/см}^3$ , то  $\rho=\rho_c\cdot e^{k_v\cdot (d-d_0)}=150\cdot e^{-2,5\cdot (1,9-1,76)}=106\text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

## 7.2 Реализация алгоритма определения удельного электрического сопротивления грунта

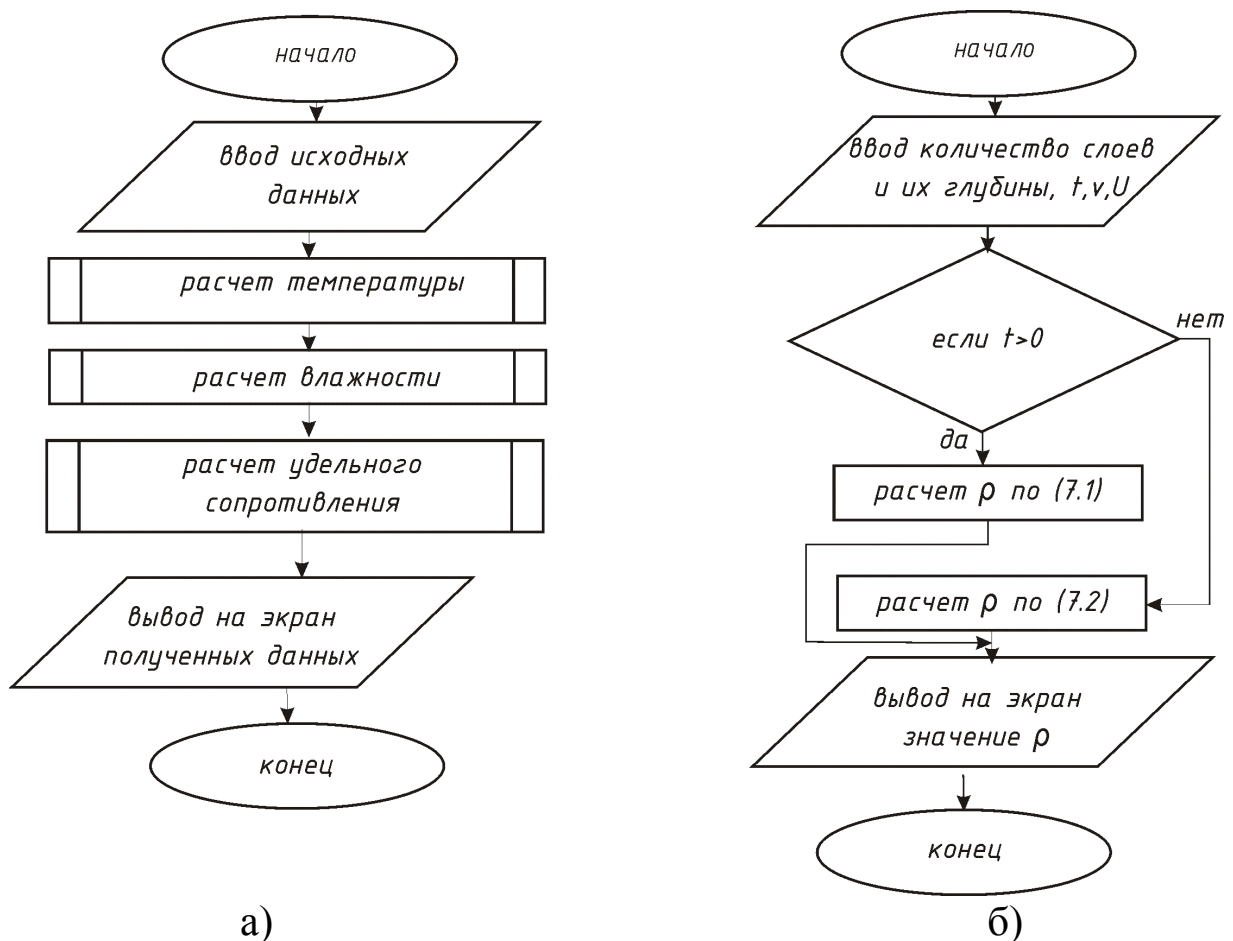


Рисунок 7.2 – Алгоритм программы (а) и процедуры (б) определения  $\rho$ .

При расчете параметров ЗУ используются формулы, в которых входит  $\rho$  грунта, а оно в реальных условиях меняется в десятки тысяч раз, т.к. зависит от множества факторов. В связи с этим возникает необходимость создания программы для расчета  $\rho$  грунта и сопротивления заземлителей в

зависимости от вида грунта, времени года, температуры, влажности и глубины его залегания. В этом параграфе предлагаются алгоритм программы и процедура для определения зависимости  $\rho$  грунта, представленные на рисунках 7.2, а и 7.2, б. В программе используется следующий алгоритм определения  $\rho$  грунта: ввод исходных данных, процедуры расчета  $t$  и  $v$  (методы их определения представлены в разделах §7.1, §7.2 и по §5.2, §5.3, соответственно). В конце выводится результат полученных данных на экран. Алгоритм процедуры расчета  $v$  показан на рисунке 7.3, а и определения  $t$  на рисунке 7.3, б.

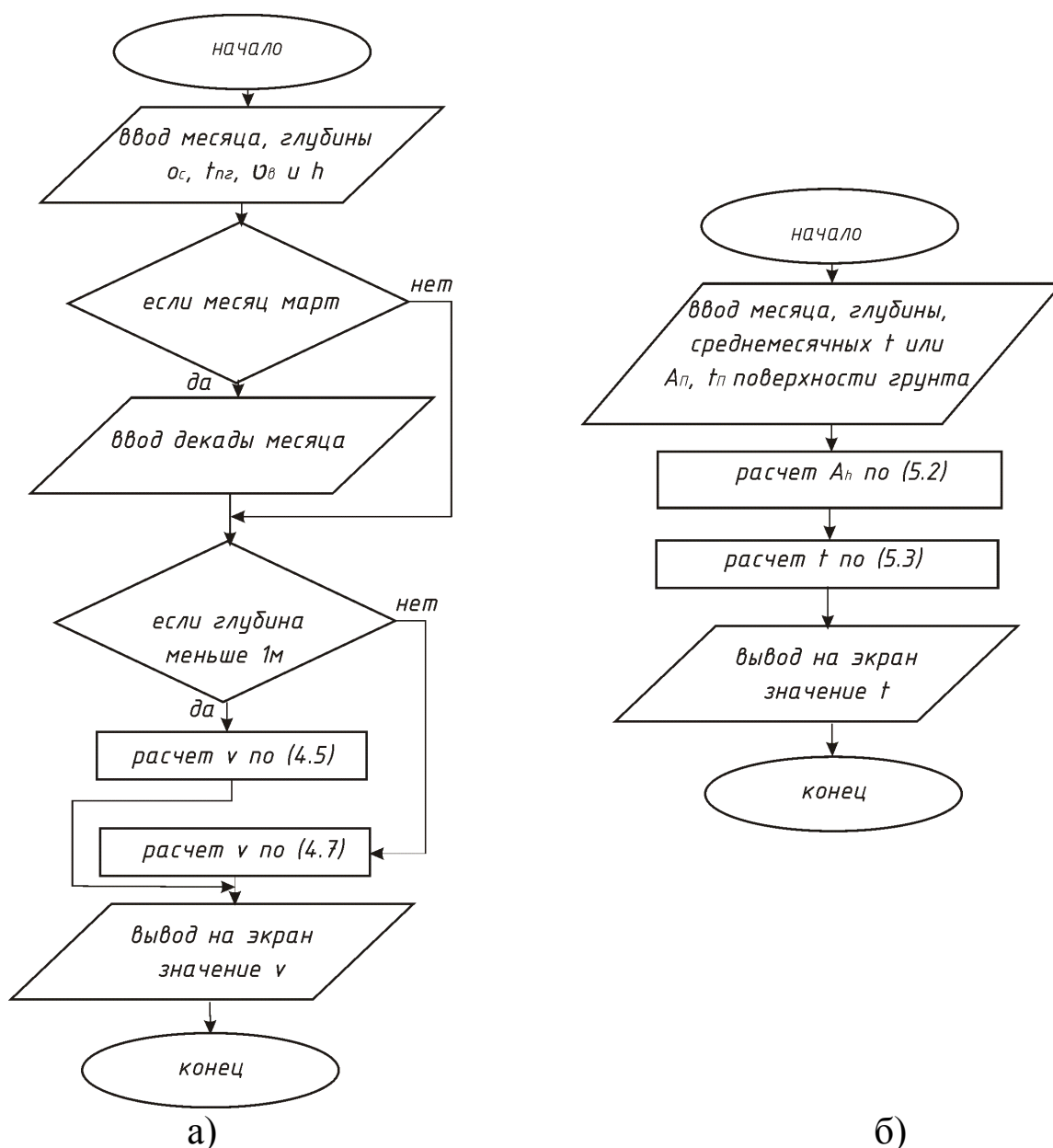


Рисунок 7.3 – Алгоритм процедуры расчета влажности (а) и температуры(б)

Пользователь устанавливает значения основных исходных параметров (по рисунку 7.1 количество слоев грунта – 3, их вид: «супесь», «песок», «глина», и толщина – 1 м, 1 м и 2 м), выбирает временной диапазон года – «июль» и получает  $t$ ,  $\nu$  и искомые значения  $\rho$ . При нажатии кнопки «расчет влажности» определяется  $\nu$  грунта с применением теории нечетких множеств. Если глубина грунта меньше 1 м, то  $\nu$  рассчитывается по первому методу на основе данных метеостанций, если больше 1 м, то – по второму методу с использованием данных геологоразведочного центра, где указывается только уровень грунтовых вод. Затем рассчитанная  $\nu$  заносится в таблицу данных, представленную на рисунке 7.1.

Для расчета температуры грунта на основе теории теплопроводности Фурье и использовании данных метеостанции г. Павлодара за 2005-2008 гг. вводятся исходные данные: среднемесячные  $t$  на поверхности грунта за год или  $t_{П}, t_{П\max}, t_{П\min}$ , глубина постоянной годовой температуры. При выборе кнопки «расчет» происходит вычисление температуры грунта по (5.3) с указанием его глубины. Если пользователь нажмет кнопку «расчет температуры» (см. рисунок 7.1), то рассчитывается температура для каждого слоя грунта. Для определения температуры на основе теплофизических характеристик грунта при нажатии кнопки «Метод 2 расчета  $t$ » (см. рисунок 7.1) необходимо ввести глубину  $h_2$ , соответствующую ей температуру  $t_2$  на поверхности грунта и измеренную через час на этой же глубине температуру  $t_1$ . После чего на искомой глубине  $h_1$  находится  $t$  грунта. Пользователь может использовать как первый, так и второй метод расчета температуры.

Разработанная программа позволяет воспроизвести зависимости  $\rho$  от  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  и  $t_1, t_2, t_3$  для первого, второго и третьего слоев супеси, песка и глины, соответственно, в виде графиков, которые приведены на рисунке 7.4.

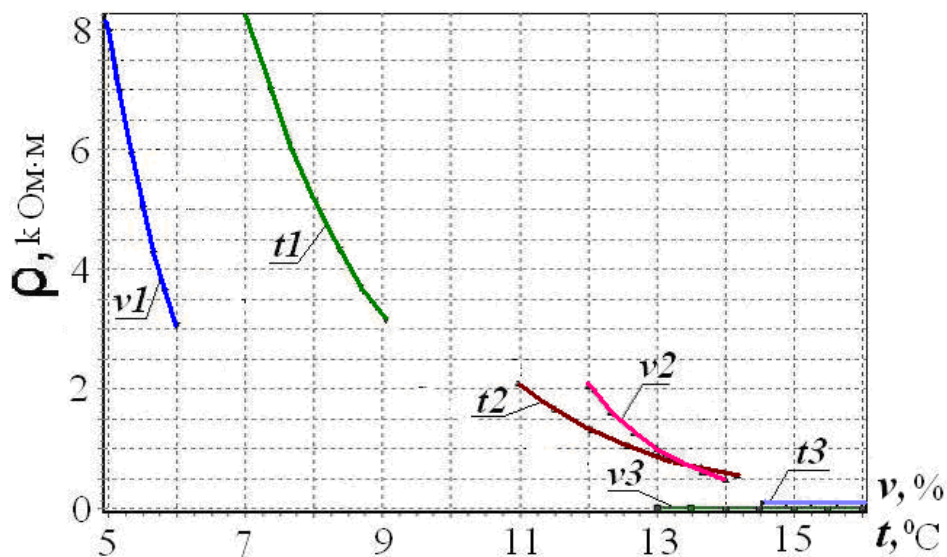


Рисунок 7.4 – Зависимость  $\rho$  от  $v$  и  $t$  для трех слоев грунта.

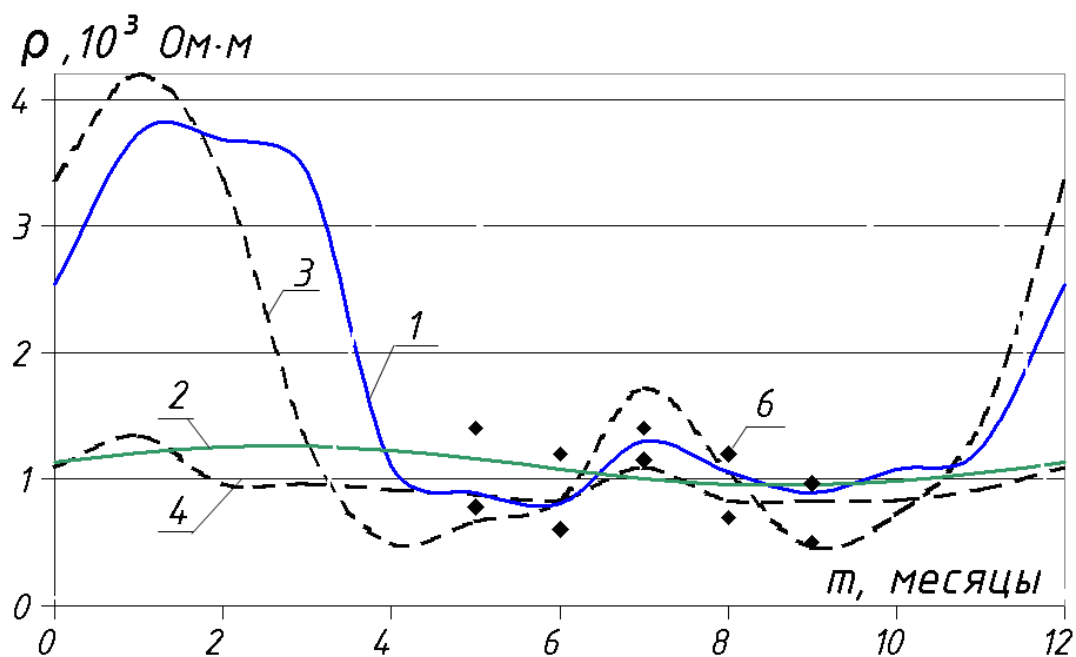


Рисунок 7.5 – Сопоставление полученных по (7.1) зависимостей  $\rho$  песка в течение года для глубин 0,7 м и 2,5 м (кривые 1 и 2) с широко известными данными (кривые 3,4) из [14] и с экспериментами (5) из [30].

Предлагаемая программа позволяет строить зависимость  $\rho$  от  $t$  и  $v$  грунта в любое время года (рисунок 7.5), и выбрать или уточнить, самый наилучший вариант значения  $\rho$  с погрешностью до 30% по сравнению с экспериментальными данными. Из рисунка 7.5 видно, при увеличении влажности грунта  $\rho$  уменьшается в весенние и осенние месяцы (кривые



1,3). С увеличением глубины залегания ЗУ  $\rho$  более стабильно (кривые 2,4). Поэтому глубоко закопанные в грунт заземлители, в том числе и вертикальные, выполняют свою задачу лучше, чем горизонтальные, прокладываемые вблизи поверхности грунта.

### **7.3 Программа для определения сопротивлений заземлителей в однородном и двухслойном грунтах**

Расчет сопротивления ЗУ принято проводить по программам, использующим метод оптической аналогии [15] (например программа «ОРУ-Проект» (НПФ ЭЛНАП, Москва) [24]), т.к. этот метод очень трудоемок, но дает более точные результаты. Его целесообразно [14] принимать в электроустановках напряжением 110 кВ и выше. В исходные данные программы вводятся: ориентировочные параметры конструкции ЗУ (протяженной, трубчатой сосредоточенной и других), глубина их залегания (любая), количество слоев грунта, их толщина и  $\rho$  каждого слоя грунта (песка, глины и т.д.). Результаты расчета сравниваются со значениями, допустимыми по ПУЭ. Если они отличаются от допустимых, более чем на 15%, то методом последовательных приближений параметры конструкции ЗУ уточняются до тех пор, пока ее сопротивление не удовлетворит требованиям ПУЭ.

В отличие от существующих программ, программа ZU.exe определяет влажность  $\nu$  и температуру  $t$  грунта в любое время года, что позволяет рассчитать  $\rho$  грунта без трудоемких измерений и выбрать наихудший его вариант, что и требуют ПУЭ, а затем произвести расчет заземления.

**Тип заземлителя в однослойном грунте**

Шаровой в земле  
 Полушаровой у поверхности земли  
 Стержневой кругового сечения (трубчатый) или уголкового у поверхн зе  
**То же в земле**  
 Протяженный на поверхности земли  
 То же в земле

**схема**

**Данные**

расчет уд. сопр.

1413,6	уд. сопр., Ом*м
2	t глубина, м
	D диаметр, мм
10	d диаметр, мм
2	l длина, м
	a сторона, м
	b сторона, м

**Условие**  
 $l > d, t - l/2 > 0.5\text{м}$ , Для уголка с шириной полки  $b = 0.95d$

**Расчет**

сопротивление, Ом

а)

**Тип сложного заземлителя в однослойном грунте**

в виде горизонтальной решетки 1  
 в виде горизонтальной решетки 2  
 в виде сетки из горизонтальных электродов без вертикальных

**схема**

**Данные**

расчет уд. сопр.

1413,6	уд. сопр., Ом*м
0,5	tв глубина, м
200	Lг длина, м
2	lv длина, м
20	n кол-во, шт
400	S площадь, м2
	A сторона, м
	B сторона, м
	C сторона, м
	D сторона, м

**Расчет**

сопротивление, Ом

б)

Рисунок 7.6 – Расчет сопротивления ЗУ в однородном грунте:  
 а) для простых, б) сложных заземлителей.

Расчет заземлителей в однородном грунте для простых электродов представлен на рисунке 7.6 а и для сложных – на рисунке 7.6 б. Расчет  $\rho$  осуществляется при нажатии кнопки «расчет уд. сопр.» с применением выше описанных методов. Для расчета сопротивления ЗУ указывается тип заземлителя и вводятся его параметры при нажатии кнопки «Расчет». При выборе кнопки «Норма» выходит окно с нормативными значениями сопротивления заземлителя [69]. В виде сложного заземлителя принимаются горизонтальная решетка квадратная или нестандартная с вертикальными и без вертикальных электродов.

Основные этапы расчета заземлителей:

1) Выбор вида заземлителя. При этом вводятся ориентировочные параметры конструкции ЗУ (вид, размеры, количество электродов).

2) Задается планируемая глубина залегания ЗУ.

3) Вводится количество слоев грунта, их толщина и вид (песок, супесь, суглинок, глина) в месте установки заземления.

4) Программа рассчитывает удельное электрическое сопротивление  $\rho$  каждого слоя грунта и эквивалентное удельное сопротивление земли для расчета заземлителя.

5) Расчет сопротивления ЗУ.

6) Сравнение полученного сопротивления со значениями, допустимыми по ПУЭ. Если оно отличается от допустимого, более чем на 15%, то методом последовательных приближений параметры конструкции ЗУ уточняются до тех пор, пока ее сопротивление не удовлетворит требованиям ПУЭ, т.е. возврат к пункту 1.

Таким образом, предлагаемая программа рассчитывает сопротивления простых и сложных заземлителей в однородной и двухслойной структуре земли.

#### **7.4 Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения разработанной программы**

В этом разделе приводится расчет экономической эффективности программы «Расчет параметров заземляющих устройств» путем сравнения затрат на реализацию базового варианта измерения удельного сопротивления грунта и варианта с внедрением разработанной программы по [71].

Эффективность внедрения программы обуславливается действием ряда факторов организационного, информационного и экономического характера. Организационный эффект проявляется в освобождение работников от трудоемких измерений удельного сопротивления  $\rho$  грунта, поездки на объекты, где необходимо его измерять и других операций, увеличив тем самым время для проведения анализа и оценки эффективности принимаемых решений, и, следовательно, уменьшения численности персонала. Информационный фактор эффективности выражается в повышении уровня информированности персонала. Экономический фактор

проявляется в том, что систематизированная информация, в конечном счете, направлена на улучшение работы работника.

Базовый вариант представляет собой поездку на объект (около 1-3 часов в зависимости от его расположения от организации), само измерение (2-3 часа) и составление акта измерения (около 2 часов), причем этим занимаются два человека, в общем, приходится 8 часов на один объект.

Внедрение разработанной программы приводит к следующим изменениям: без трудоемких измерений снижение затрат труда (в человеко-часах) и при обработке данных, сокращение численности персонала; получение более полной результативной информации и сокращение сроков ее обработки. Эти факторы, определяющие экономический эффект внедрения программы приводят к прямой экономической эффективности [71].

Рассмотрим трудоемкость работ Тр организации до и после внедрения программы. Рабочее дневное время двух работников составит 8 часов. В одном месяце 22 рабочих дня. Тр с базовым вариантом составит  $22 \cdot 8 = 176$  часов в месяц. Количество объектов зависит от числа заказов. Измерения проходят только в благоприятную погоду (в дождь измерения проводить запрещено по технике безопасности). Предполагается, что таких дней в месяце – 15. При использовании программы (полчаса на один объект) на 15 объектов приходится 7,5 часов (1 день) одного работника. (Сравнительная оценка представлена в виде соотношения 15:1). Внедрение программы позволит существенно увеличить эффективность работы за счет уменьшения временных затрат и уменьшить трудоемкость работ организации.

Затраты на заработную плату работников в год: Общая сумма до внедрения  $Z_{п1} = \text{оклад} \cdot \text{численность рабочих} \cdot \text{количество месяцев} = 20000 \text{ руб} \cdot 1 \text{ рабочий} \cdot 12 \text{ месяцев} + 25000 \text{ руб} \cdot 1 \text{ старший рабочий} \cdot 12 \text{ месяцев} = 240000 + 300000 = 540000 \text{ руб}$ . Общая сумма после внедрения  $Z_{п2} = 20000 \text{ руб/час} \cdot 1 \cdot 12 \text{ месяцев} = 240000 \text{ руб}$ .

Расчет стоимости оборудования и эксплуатационных расходов. Для измерения  $\rho$  используются электроизмерительные приборы С.А 6460 и С.А 6462 (CHAUVIN ARNOUX, Франция, тестеры грунта и устройств

заземления) стоимости  $Ст=60000$ руб. Срок службы прибора  $Ссл=12$  лет, ежегодная поверка прибора  $Пп=4500$  руб. Общие затраты на прибор =  $Ст + Сл \cdot Пп = 114000$ руб за 12 лет. Стоимость эксплуатации прибора в год составит  $Стпр=9500$ руб.

Таким образом, полная себестоимость базового варианта  $Сбв = Зр1+Стпр = 549500$ руб, а с внедрением разработанной программы  $Свп=Зр1 +$  стоимость разработанной программы  $=240000$  руб + 0 = 240000 руб.

Ожидаемый экономический эффект  $Ээ=(Сбв - Свп)= 549500-240000=309500$  руб.

Таблица 7.1 – Основные показатели

Показатели	Единица измерения	До внедрения	После внедрения
Численность	Чел.	2	1
Трудоемкость работ в месяц	дней	15	1
Затраты на зарплату в год	руб	540000	240000
Затраты на оборудование в год	руб	9500	0
Полная себестоимость	руб	549500	240000
<b>Годовой экономический эффект</b>	руб	-	<b>309500</b>

Для сравнения базового и внедряемого варианта все основные показатели введем в таблицу 7.1.

По результатам расчетов можно заключить, что внедрение программы «Расчет параметров заземляющих устройств» является экономически выгодным мероприятием.

Программа, основанная на предлагаемом алгоритме, позволяет рассчитать сопротивления простых и сложных ЗУ в течение года в однородном, двухслойном и многослойном грунтах. Использование этой программы при проектировании ЗУ позволит за счет освобождения персонала от трудоемких измерений удельного сопротивления грунта получить, например, годовой экономический эффект 309500 руб.

### 7.5 Вопросы для проверки знаний

1. Перечислите существующие программы расчета параметров заземлителей. В чем их отличие от представленной здесь.
2. Какова погрешность расчета  $\rho$  по представленным формулам?
3. Какова зависимость изменения  $\rho$  во времени?
4. Перечислите, какие параметры влияют на  $\rho$  грунта.
5. В чем состоит эффективность использования и внедрения предложенных формул для расчета  $\rho$  грунта?
6. Каков алгоритм расчета температуры, влажности и плотности грунта?
7. Что дает аналитический расчет температуры, влажности и плотности грунта?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения сопротивлений заземлителей применяются формулы, учитывающие однослойную, двухслойную или многослойную структуру земли, с погрешностью, не выше 5-20%, если удельное сопротивление  $\rho$  грунта определено экспериментально. Существующая методика оптической аналогии на сегодняшний день является наиболее точной. Ее погрешности не превышает 10%.

Сравнение имеющихся программ («ОРУ-М», «Zazemlitel 1.0» и т.д.) по расчету сопротивлений заземлителей показало, что их основным недостатком является ввод измеренного  $\rho$  грунта, умноженного на сезонные коэффициенты, или среднего его значения без учета зависимости  $\rho$  от температуры и влажности.

Известные формулы и сезонные коэффициенты, рекомендуемые ПУЭ, по которым можно рассчитать  $\rho$ , как показывают многочисленные эксперименты (в том числе и наши) дают лишь приблизительную картину его изменения от выше перечисленных параметров грунта, которые в реальных условиях меняются в широких пределах.

Для решения задачи определения удельного сопротивления грунта применен математический аппарат нечетких множеств, так как он позволяет решать задачи с нечеткими исходными данными (влажность характеризуется нечетко из-за отсутствия четкой границы между лингвистическими понятиями «сухо» и «влажно»).

Основная идея теории нечетких множеств расширение классического понятия множества  $E$  в том, что функция принадлежности элемента множеству может принимать любые значения в интервале  $[0;1]$ . При этом функция принадлежности  $\mu_A(x)$  указывает степень (или уровень) принадлежности элемента  $x$  подмножеству  $A$ . Для определения функций принадлежности используем прямой метод, в котором для каждого  $x \in E$  задается значение  $\mu_A(x)$ . Это правомерно, поскольку метод применяется для измеримых понятий, а влажность, несомненно, относится к этим понятиям.

Строящаяся модель имеет вид  $y_\phi = \sum_{i=0}^N \mu_i(v) \cdot \eta_i(v)$ , где  $\eta_i(v)$  -

регрессионная зависимость, полученная экспериментально,  $N$  – количество подмножеств.

Разработанная в 2008 году методика [30] определения  $\rho$  грунта в зависимости от температуры и влажности с использованием теории нечетких множеств позволяет находить его  $\rho$  с достаточной для практики точностью.

На основе проведенных исследований предлагается определять удельное сопротивление грунта при положительных температурах с помощью следующей последовательности действий:

1 – экспериментально определяется  $\rho$  при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  при изменении значения параметра "влажность" от 0% до насыщения водой рассматриваемого вида грунта;

2 – определяется базовое терм-множество с соответствующими функциями принадлежности  $\mu_i(v)$  и функциями регрессии  $\eta_i(v)$  каждого терма;

3 – по формуле (3.13) вычисляется значение  $\rho_{20}$  грунта при заданной влажности;

4 – вычисляется значение  $\rho$  для любой температуры по формуле (1.14) при условии  $t \geq 0^{\circ}\text{C}$ .

Для отрицательных температур расчет  $\rho$  для песка и супеси выполняется по формулам (3.14)-(3.16), при предварительном моделировании сопротивления  $\rho_{п}^0$  и  $\rho_{с}^0$ , которое рассчитывается по (3.13) при  $20^{\circ}\text{C}$  и (1.14) при  $0^{\circ}\text{C}$ , затем находится резкое увеличение  $\rho$  по (3.14) до  $-1^{\circ}\text{C}$ . При температуре ниже  $-1^{\circ}\text{C}$   $\rho$  определяется по (3.15).

Разработаны методы, позволяющие определять влажность грунта. Первый для глубин до 1 м в зависимости от климатических условий с погрешностью не выше 50%, а второй - от 1 м до 15 м - от уровня грунтовых вод с погрешностью не выше 20% для сухих и 10% для влажных грунтов. В отличие от известных, они основаны на использовании нечеткой логики.

Найдена зависимость температуры грунта от его глубины и времени года на основе данных метеостанций (погрешность расчета до 15%), но без использования коэффициента температуропроводности.



Разработан метод определения теплофизических характеристик грунта глубиной до 1 м, позволяющий рассчитать его температуру по известным формулам с погрешностью до 10%. При его разработке впервые использована нечеткая логика.

Получена зависимость  $\rho$  грунта от плотности.

На основе созданных методов разработаны алгоритмы и программа, дающие возможность определять  $\rho$  грунта и сопротивления заземляющих устройств без трудоемких измерений температуры и влажности на глубине заземлителей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987.–648 с.
2. Федоров А.А. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 264 с.
3. Васильев А.А., Крючков И.П., Наяшкова Е.Ф. и др. Электрическая часть станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.: ил.
4. Алиев И.И. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. – Ростов н/Д.: Феникс, 2004. – 480 с.
5. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. – М: НГТУ, МЭИ ТУ, НПФ ЭЛНАП и АО "Фирма ОРГРЭС", 2000. – 54с.
6. Бухаров А.И., Петунин В.В. Основы безопасной эксплуатации электроустановок. – М.: Военное издательство, 1989.- 272 с.
7. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под ред. В.Г. Герасимова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.: ил.
8. Карякин Р.Н., Солнцев В.И. Заземляющие устройства промышленных электроустановок: Справочник электромонтажника / Под ред. Смирнова А.Д. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 191с.:ил.
9. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник. - М.: Энергосервис. 2002.
10. Карякин Р.Н. Нормы устройства сетей заземлений. – М.: Энергосервис, 2002. – 234с.: ил.
11. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: Учеб.для проф.учеб.заведений./Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин, В.А. Яшков – М.: Высш. шк., 2001. – 336 с.: ил.
12. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат. 1986. –640 с.
13. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок. – М.: Энергия, 1981. – 160 с.
14. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. пособие для вузов. М.:

Энергоатомиздат, 1984. - 448 с., ил.

15. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.: ил.

16. Адрес электронной почты [info@promspravka.ru](mailto:info@promspravka.ru) - Новости электротехники 1(19) 2003.

17. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

18. Найфельд М.Р. Защитные заземления в электротехнических установках. М., Госэнергоиздат, 1956.

19. Güemes J.A. Hernando F.E. Method for calculating the ground resistance of grounding grids using FEM // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, №2. – P. 595–600.

20. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978 г. – 224с.: ил.

21. Михайлов М.И., Соколов С.А. Заземляющие устройства в установках электросвязи: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1971. – 200 с.: ил.

22. Кораблев В.П. Устройства электробезопасности. – М.: Энергия, 1979. – 72с.: ил. - (Б-ка электромантера. Вып. 60)

23. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1984. - 824 с.: ил.

24. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. – М: МЭИ ТУ и НПФ ЭЛНАП, 2004. – 60 с.

25. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. – М.: Высшая школа, 1973. – 752с.: ил.

26. Нестеров С.В. Модификация метода оптической аналогии. Сборник научных трудов НГТУ. - 1996. - №3. – С. 1-6.

27. Безрук В.М. Геология и грунтоведение. - М.: «Недра», 1977.–256 с.

28. Ковды В.А., Розанова Б.Г. Почвоведение. Учеб. для ун-тов. – М.: Высш. шк., 1988. – 400 с: ил.

29. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов: Учеб. пособие для автом. - дор. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. - 239 с., ил.

30. Зайцева Н.М., Зайцев Д.С., Клецель М.Я. Зависимости удельного электрического сопротивления грунта от влажности

и температуры //Электричество. 2008 г, №9 - С. 30-34.

31. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. РАО «ЕЭС России». 1999 г.

32. Попов А.А. Регрессионное моделирование на основе нечетких правил.// Сборник научных трудов НГТУ.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. - №2(19) - С. 49-57.

33. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. - М.: Мир, 1982.

34. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>

35. <http://www.itlab.unn.ru/fuzzylogic/> - Ефимов А.С., Морёнов О.А. Основы нечеткой логики, логико-лингвистические модели // Материалы семинара ITLab. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2004.

36. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – Учеб. пособие. М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. – 224 с.

37. Богатырев Л.Л., Манусов В.З., Содномдорж Д. Математическое моделирование режимов электроэнергетических систем в условиях неопределенности. – Улан-Батор: Изд-во Типографии МГТУ, 1999. – 348 с.

38. <http://ru.wikipedia.org/wiki> - Нечеткая логика - математические основы.

39. Вознесенский В.А. Статические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981.- 263 с.

40. Зайцева Н.М., Зайцев Д.С. Разработка системы нечетких правил для модели удельного сопротивления грунта// Журнал «Наука и техника Казахстана» 2004. - №3. С. 39-44.

41. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов / Э. Ферстер, Б. Рёнц. Перевод с немецкого Ивановой В.М. – М.: «Финансы и статистика», 1983. – 300 с.: ил.

42. Тарасевич Ю.Ю. Численные методы. – Астрахань: Астраханский гос. пед. ун-т, 2000. – 70с.

43. ГОСТ 28268-89 Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности

устойчивого завядания растений.

44. ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.

45. Официальный сайт ГНУ ВНИИО Российской академии сельскохозяйственных наук <http://vniioh.ru/opredelenie-vlazhnosti-pochvy-termostatno-vesovoj-metod/>

46. Горбылева А.И. Почвоведение с основами геологии: Учеб. пособие / А.И. Горбылева, Д.М. Андреева, В.Б. Воробьев. – Мн.: Новое знание, 2002. – 480 с.: ил.

47. Васильев А.А., Крючков И.П., Наяшкова Е.Ф. и др. Электрическая часть станций и подстанций. – М: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.: ил.

48. Добровольский В.В. География почв с основами почвоведения: Учеб. для студентов. – М.: Изд. Владос, 2001. – 384с.: ил.

49. Рогов В.А. Методика и практика технических экспериментов: Учеб. пособие. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 288 с.

50. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976.

51. Определение влажности грунта на глубине заземлителей / Зайцева Н.М., Исабекова Б.Б. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2010. - №2 - С. 352-355.

52. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Технические требования к производству работ. СН РК 1.02-18-2007.

53. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метрология и климатология: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 528 с.:ил.

54. Шульгин А.М. Агрометеорология и климатология. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 200 с.

55. Лосев А.П., Журина Л.Л. Агрометеорология. – М.: КолосС, 2004. – 301 с.: ил.

56. Расчет удельного сопротивления грунта с учетом колебаний его температуры / Зайцева Н.М., Исабекова Б.Б., Клецель М.Я. // Научн. пробл. трансп, Сиб. и Дал. Вост. Спец. вып. – 2010. - №1. – С. 215-230.

57. Кідрук М.І. Моделювання та оптимізація систем теплопостачання будівель з використанням відновних джерел

енергії. Частина 1: Моделювання теплового режиму будинку. // (Україна) Журнал «Нова тема». 2007 г., №4 – с. 13–16.

58. ГОСТ 25358-82. Грунты. Метод полевого определения температуры.

59. Разработка температурно-влажностной модели однородного грунта / Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова // Вестник ИНЕУ. – 2008. – №1. – С. 25-29.

60. Моделирование годового колебания температуры вглубь грунта для расчета его электрического сопротивления / Исабекова Б.Б., Зайцева Н.М. // Труды XII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты» МКЭЭЭ-2008 – М.: Издатель Институт электротехники МЭИ. – 2008. – С. 303

61. Васильев Г.П. Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения и эффективность их применения в климатических условиях России // АВОК (Журнал по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике). - 2007. - №5. – С. 58-74.

62. Определение температуры грунта на глубине заземлителей / М.Я. Клецель, Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова // Электричество. – 2011.- №7. –С.19-24.

63. Сапожникова С.А. Микроклимат и местный климат. – Л.: ГИМИЗ, 1950.

64. Большая советская энциклопедия. Т 11 – М: «Советская энциклопедия», 1973. – 607 с.: ил.

65. Technique of determination of ground temperature at a depth of grounding conductor / N.M. Zaitseva, B.B. Isabekova, M.Y. Kletsel // 13th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components ICEEE-2010.– 2010. – С. 51-52

66. Растворова О.Г. Физика почв (Практическое руководство). – Л: Изд-во Ленингр ун-та, 1983. – 196 с.: ил.

67. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.

68. Инновационный патент №20839 Республики Казахстан. Установка для определения электропроводности грунта // Зайцева Н.М., Зайцев Д.С. Опуб. 16.02.2009. Бюл. №2 – 4 с.: ил.

69. ГОСТ 12.1.030-81 [СТ СЭВ 3230-81] Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. Введ. 01.07.82. - М.: Изд-во стандартов, 1982. – 10 с.

70. Экономические расчеты в дипломных проектах по техническим специальностям: методические указания для студентов ФТК. Горчакова Л.И., Лопатин М.В. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 28 с.

71. В.Т. Водяников В.Т. Теоретические основы экономической оценки информационных технологий и систем./ В.Т. Водяников // Агржурнал МГАУ, В7. - 2010.

## Приложение А

Пределы электрического удельного сопротивления  
водосодержащих пород  $\rho$

Геологический возраст пород	Удельное сопротивление $\rho$ , Ом*м				
	Морской песок, глинистый сланец	Континент альные пески, песчаник	Вулканичес кие породы (базальты, туфы)	Граниты, габбро	Известняк и, доломиты, ангидриты , соль
Третичный, четвертичный	1÷10	15÷20	10÷2·10 <sup>2</sup>	5·10 <sup>2</sup> ÷2·10 <sup>3</sup>	50÷5·10 <sup>3</sup>
Мезозойский	5÷20	25÷10 <sup>2</sup>	20÷5·10 <sup>3</sup>	5·10 <sup>2</sup> ÷2·10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup> ÷10 <sup>4</sup>
Карбоновый	10÷40	50÷3·10 <sup>2</sup>	50÷10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> ÷5·10 <sup>3</sup>	2·10 <sup>2</sup> ÷10 <sup>5</sup>
Докарбоновый палеозой	40÷200	10 <sup>2</sup> ÷5·10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> ÷2·10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> ÷5·10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup> ÷10 <sup>5</sup>
Докембрийс- кий	10 <sup>2</sup> ÷2·10 <sup>3</sup>	3·10 <sup>2</sup> ÷5·10 <sup>3</sup>	2·10 <sup>2</sup> ÷5·10 <sup>3</sup>	5·10 <sup>3</sup> ÷20·10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup> ÷10 <sup>5</sup>

## Приложение Б

Значения пористости  $\Phi$ , параметров  $a_*$  и  $m_*$   
для водонасыщенных пород

Формации водонасыщенных пород	$\Phi$	$a_*$	$m_*$
Песок (девон, мел, эоцен)	0,15÷0,367	0,62	2,15
Песчаник (юра)	0,14÷0,23	0,62	2,1
Чистый миоценовый песчаник	0,11÷0,26	0,78	1,92
Чистый меловой песчаник	0,08÷0,25	0,47	2,23
Чистый ордовикский песчаник	0,07÷0,15	1,3	1,71
Сланцевый песчаник (эоцен)	0,09÷0,22	1,8	1,64
Сланцевый песчаник (олигоцен)	0,07÷0,26	1,7	1,65
Сланцевый песчаник (мел)	0,07÷0,31	1,7	1,8
Оолитовый известняк (мел)	0,07÷0,19	2,3	1,64
Оолитовый известняк (юра)	0,09÷0,26	0,73	2,1
Кремнистый известняк (девон)	0,07÷0,3	1,2	1,88
Известняк (мел)	0,08÷0,3	2,2	1,65



## Приложение В

### Удельное электрическое сопротивление грунтов

Таблица В.1 – Удельное электрическое сопротивление грунтовых вод

Образец породы	Сопротивление при 20°C, Ом *м	
	Пределы изменения	Среднее значение
Изверженные породы	3÷40	7,6
Современные и плейстоценовые континентальные осадки	1÷27	3,9
Третичные осадки	0,7÷3,5	1,4
Мезозойские осадочные породы	0,31÷47	2,5
Палеозойские осадочные породы	0,29÷7,1	0,93
Хлоридные воды нефтяных месторождений	0,049÷0,95	0,16
Сульфатные воды нефтяных месторождений	0,43÷5	1,2
Бикарбонатные воды нефтяных месторождений	0,24÷10	0,98

Таблица В.2 – Рекомендуемые расчетные значения удельного электрического сопротивления верхнего слоя земли (мощностью не более 50 м)

Слой земли	Сопротивление земли, Ом*м
Песок (при температуре выше 0°C):	
-сильно увлажненный грунтовыми водами	10÷60
-умеренно увлажненный	60÷130
-влажный	130÷400
-слегка влажный	400÷1500
-сухой	1500÷4200
Суглинок:	
-сильно увлажненный грунтовыми водами (при температуре выше 0 °C)	10÷60
-промерзший слой (при температуре -5 C)	60÷190
Глина (при температуре выше 0°C)	20÷60

Торф:	
-при температуре около 0°С	40÷50
-при температуре выше 0°С	10÷40
Солончаковые почвы (при температуре выше 0°С)	15÷25
Щебень:	
- сухой	Не менее 5000
- мокрый	Не менее 3000
Дресва (при температуре выше 0°С)	5500
Гранитное основание (при температуре выше 0° С)	22500

Таблица В.3 – Пределы изменения значений  $\rho$  для разных типов грунтов

Тип грунта	Удельное сопротивление, $\rho$ , Ом·м
Почвенный слой	$50-1 \cdot 10^4$
Пески чистые: сыпучие естественной влажности водоносные	$4 \cdot 10^3-1,5 \cdot 10^5$ $150-2 \cdot 10^3$ $50-4 \cdot 10^2$
Пески с примесью глины (до 3%): неводоносные водоносные	80-200 55-130
Супеси, (3-16% глины): неводоносные водоносные	45-115 20-70
Суглинки, (12-25% глины): неводоносные водоносные	17-46 17-32
Глины (более 25% глины): неводонасыщенные водонасыщенные	1-30 0,7-20
Галечники чистые: неводоносные водоносные	$4 \cdot 10^2-1 \cdot 10^4$ $2 \cdot 10^2-1 \cdot 10^3$

Песчано-глинистые отложения с гравием, галькой и валунами: - неводоносные - водоносные	$90-3 \cdot 10^3$ $25-8 \cdot 10^2$
Щербнисто-древесные отложения: - с супесчаным заполнителем - с глыбами (до 40%)	$270-330$ $420-780$
Валунно-галечные отложения с песчаным заполнителем: - неводоносные - водоносные	$8 \cdot 10^2-2 \cdot 10^4$ $85-4 \cdot 10^3$
Известняки	$60-5 \cdot 10^3$
Скальные породы (сланцы, граниты): - разрушенные и выветренные - крепкие	$6 \cdot 10^2-1 \cdot 10^3$ $2 \cdot 10^3-1 \cdot 10^5$

***ЗАЙЦЕВА Наталья Михайловна,  
ИСАБЕКОВА Бибигуль Бейсембаевна,  
КЛЕЦЕЛЬ Марк Яковлевич***

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

**монография  
пособие для магистрантов и докторантов**

Ответственный за выпуск: Русина Л.Н.  
Компьютерная верстка: Овдиенко Ю.С.  
Дизайн обложки: Романов Д.Ю.

Сдано в набор 07.04.2014 г. Подписано в печать 12.04.2014 г.  
Формат 64x80/16. Усл.печ.лист 9,25.  
Заказ № 95 Тираж 250 экз.

Отпечатано в типографии редакционно-издательского отдела  
Инновационного Евразийского университета  
140003, Павлодар, ул. М. Горького 102/4  
тел. (87182) 57-49-65

*За ошибки в авторском тексте  
редакция ответственности не несет*