

На правах рукописи

Зименков Павел Сергеевич

РАЗРАБОТКА АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ И ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Санкт – Петербург

2013 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении
«Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова»

Научный руководитель

кандидат технических наук,
зав. отделом метрологии
ФГБУ «ГГО»
Окоренков Вадим Юрьевич

Официальные оппоненты

доктор технических наук,
главный научный сотрудник
ФГБУ «ГГО»
Синькевич Андрей Александрович

доктор технических наук,
профессор, профессор СПб
университета Государственной
противопожарной службу МЧС РФ
Ложкин Владимир Николаевич

Ведущая организация

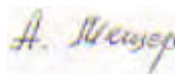
федеральное государственное
бюджетное учреждение
«Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт»

Защита состоится «11» декабря 2013г. в 11 часов
на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
Д327.005.01 федерального государственного бюджетного учреждения
«Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова» по адресу: 194021,
г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального
государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая
обсерватория им. А.И.Воейкова»

Автореферат разослан «08» ноября 2013г.

Ученый секретарь по защите
Докторских и кандидатских диссертаций,
доктор географических наук



А. В. Мещерская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Атмосферные явления, сопровождающиеся возникновением скользкости дороги, оказывают значительное влияние на скоростной режим и безопасность движения транспортных средств. Минимизация экономических потерь, вызванных возникновением скользкости дороги, может быть достигнута при адаптированном локальном подходе по ликвидации или предотвращению её появления. Исходными данными для принятия решения по ликвидации или предотвращению появления скользкости являются результаты измерений автоматических дорожных метеорологических станций (АДМС), оснащенных специализированными дорожными датчиками. Эффективность такой информационной системы зависит от применяемых измерительных инструментов и мест их расположения. Очевидно, что метеоданные с наблюдательной сети метеостанций могут применяться для грубой оценки метеоусловий на близлежащих дорогах. Для более точных измерений и прогнозов необходимо использование и размещения автоматических дорожных метеорологических станций (АДМС) со специализированными дорожными датчиками в непосредственной близости или на самой дороге. Наличие в составе АДМС специализированных дорожных датчиков, позволяющих оценивать текущее состояние дорожного покрытия, определяют качество выдаваемой потребителю метеоинформации. Порядок проведения метеорологических наблюдений на дороге описан в Руководстве ВМО № 8.

Ряд иностранных фирм занимается выпуском АДМС, оснащенных специализированными дорожными датчиками с различными принципами действия. Ввиду специфики выполнения измерений, а также многообразия факторов, влияющих на свойства слоя, определяющего текущее состояние поверхности, создание подобных датчиков представляет сложнейшую задачу.

Несмотря на то, что данный вопрос существует несколько десятилетий, в России такие датчики не производят.

Все многообразие выпускаемых датчиков можно разделить на две группы: бесконтактные и контактные. Контактные датчики включают две подгруппы, это активные и пассивные: изменяющие и не изменяющие соответственно температуру анализируемого слоя.

К недостаткам бесконтактных датчиков относятся отсутствие возможности определения состояния нижнего слоя при многослойной структуре водно-ледового слоя (ВЛС) и постоянное загрязнение оптических узлов; достоинством является не подверженность механическому износу и простота установки. Контактные датчики, напротив, определяют лишь нижний слой при многослойной структуре, подвержены механическому износу и сложны в установке.

Наиболее полную информацию можно получить, используя данные с обоих типов датчиков. Однако, принимая во внимание тот факт, что на безопасность движения более сильное влияние оказывает состояние именно нижнего слоя при многослойной структуре, то развитие контактных датчиков является приоритетным.

В контактных датчиках определение состояния слоя выполняется на основе результатов измерений температуры ВЛС и электрических характеристик сенсора, контактирующего с исследуемым слоем, таких как проводимость, емкость, поляризация. Толщину слоя определяют оптическим способом (реализован в дорожном сенсоре DRS511) или путем сопоставления электрических характеристик сенсоров различных геометрических размеров (выделение емкостных составляющих реализовано в патенте №: US 6,239,601 Weinstein L. M. Thickness measurement device for ice, or ice mixed with water or other liquid.).

Недостатком оптического способа является низкая помехоустойчивость, вызванная измерением толщины в объеме ВЛС,

ограниченном малыми размерами оптического сенсора. Это означает, что наличие, например, песчинки на сенсоре способно значительно повлиять на точность измерений.

Недостатком способа выделения емкостных составляющих с импеданса (полного сопротивления) сенсоров различной геометрии является низкая точность при низких значениях импеданса.

Актуальность темы диссертационной работы определяется тем, что в ней рассматриваются вопросы разработки и исследования метрологических характеристик нового дорожного датчика (ДД), предназначенного для контактного определения метеоусловий на дорожной поверхности и входящего в состав измерительной системы гололедно-изморозевых отложений (ИСГИО) или в состав АДМС. В дорожном хозяйстве имеется потребность в АДМС (ОДМ 218.2.003-2009 «Методические рекомендации по специализированному прогнозу состояния дорожного покрытия»). ИСГИО могут найти применение на сети Росгидромета, а также для нужд министерства обороны РФ (МО РФ).

Цель работы состоит в разработке и исследовании метрологических характеристик устройства для наблюдений за метеоусловиями на дорожной поверхности с целью применения измеренных величин в системах мониторинга окружающей среды и прогнозирования образования скользкости. В соответствии с этим в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

- ✓ Выбор способа определения метеоусловий на дорожной поверхности.
- ✓ Измерения толщины слоя косвенным способом на основе предложенного уравнения.
- ✓ Разработка ДД и исследование его метрологических характеристик.
- ✓ Проведение натурных испытаний ДД.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые применено плоскопараллельное расположение трех электродов с разными расстояниями между ними; присутствует возможность объединения любой пары электродов в приемный элемент; подключение приемных элементов поочередно к измерительному каналу сопротивления на переменном токе и к измерительному каналу сопротивления и напряжения поляризации на постоянном токе; принимаемый диапазон сопротивлений приемных элементов разделен на поддиапазоны – подтверждается патентом на изобретение № 2464580.

2. Рассчитана зависимость отношения проводимости сенсоров различной геометрии от толщины ВЛС.

3. Разработаны и изготовлены образцы анализаторов-измерителей состояния слоя воды/льда с примесями на дорожной поверхности (дорожные датчики), предназначенные для наблюдений за метеоусловиями на дорожной поверхности. Приборы позволяют проводить контактные измерения температуры поверхности; определять состояние и вычислять толщину ВЛС на дорожной поверхности, на основе выполняемых измерений импеданса и напряжения поляризации (возникновение обратной электродвижущей силы) сенсоров.

4. Проведены лабораторные и натурные испытания образцов анализаторов-измерителей состояния слоя воды/льда с примесями на дорожной поверхности. Показана возможность приборов определять состояние (тип) и толщину слоя воды. Показана способность приборов различать состояние слоя в градациях «сухо», «мокро», «мокрый лед/снег» «лед», а также «наличие» и «отсутствие» антиобледенительных реагентов.

Практическая ценность состоит в том, что разработаны образцы анализаторов-измерителей состояния слоя вода/льда, которые целесообразно

включать в состав новых автоматических дорожных станций или интегрировать в уже эксплуатируемые, а также применять в МО РФ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Образец анализатора-измерителя состояния слоя воды/льда с примесями на дорожной поверхности по измеренным импедансам, напряжениям поляризации сенсоров и температуре поверхности.

2. Результаты лабораторных и натурных исследований анализатора-измерителя состояния слоя воды/льда с примесями на дорожной поверхности.

Достоверность результатов. Все используемые при испытаниях средства измерений поверены, а испытательные камеры – аттестованы. При натурных испытаниях для сравнения результатов использовалась серийно выпускаемая автоматизированная информационно измерительная система ROSA (ГР № 31300-06).

Личный вклад автора. Все представленные в работе результаты получены самим автором или при его участии.

Непосредственно автором разработана конструкция, электрическая схема, программное обеспечение датчика. Выполнен расчет зависимости отношения проводимостей сенсоров различной геометрии от толщины слоя. Оценено влияние мешающих факторов на точность измерения толщины слоя. Вычислена зависимость соответствия градаций состояний дорожной поверхности от температуры и концентрации антиобледенительного реагента (на примере поваренной соли). Разработана методика и проведены лабораторные и натурные испытания разработанного датчика, выполнен анализ результатов.

Апробация полученных результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Ученом Совете ФГБУ «ГГО» (2009, 2012).

Внедрение. Образцы и результаты их апробаций были использованы в федеральном государственном бюджетном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова» при выполнении НИР «Сперансы» в 2006 – 2007гг. и в ОКР «Сперансы» в 2008г.

В 2013г. подана заявка на проведение испытаний в целях утверждения типа средства измерений – анализатора-измерителя состояния слоя воды/льда с примесями на дорожной поверхности ДПТ1.

Публикации.

Результаты исследований и разработок, выполненных автором лично, отражены в одном патенте на изобретение и двух опубликованных статьях в трудах ГГО вып. 560 и 566 (из списка изданий рекомендованных ВАК).

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 110 страниц, 15 таблиц, 20 рисунков. Список литературы на русском и английском языках содержит 58 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, приведены результаты апробации работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируются факторы, сопутствующие образованию скользкости на дорожной поверхности: к явлениям, вызывающим снижение коэффициента сцепления колеса с дорогой относят гололедицу, «черный лед», гололед и снежный накат.

Рассматривается развитие инструментальных средств для измерений характеристик гололедно-изморозевых отложений (ГИО). Проведен анализ современных средств измерений метеоусловий на дорожной поверхности и их характеристик, представленных в таблице 1.

Выбрано направление исследований, в соответствии с которым рассматриваются параметры, характеризующие форму существования воды на дорожной поверхности, измерение которых позволяет автоматически идентифицировать присутствующую форму.

Выявлены недостатки дорожного сенсора DRS511 и устройства (Patent №: US 6,239,601 B1) и обоснованы способы их устранения. Определение состояния дорожной поверхности предложено основывать на измеренном импедансе сенсоров, а электроды располагать так, чтобы минимизировать в пространстве расстояние между образуемыми сенсорами – плоскопараллельно с одним общим электродом.

Сформулированы требования, которым должен отвечать разрабатываемый дорожный датчик для эксплуатации в реальных условиях.

Таблица 1.

Тип СИ Метр. хар.	DRS511	IRS31- UMB	ARS31PRO- UMB	DSC111	NIRS31-UMB
Описание типа СИ, ГР	31300-06	51780-12	- ¹	43636-10	49171-12
Диапазон измерений температуры поверхности, °С	-40...+60	-40...+70	-40...+80	- ²	-40...+70
Погрешность измерений температуры поверхности, °С	0,1	0,5	0,5 0,2, при -10...+10	- ²	0,8
Диапазон измерений температуры льдообразования, °С	- ²	- ²	-20...0	- ²	- ²
Погрешность измерений температуры льдообразования, °С	- ²	- ²	1,5 0,5, при -15...0	- ²	- ²
Диапазон измерений слоя, мм - воды - льда - снега	- ² - ² - ²	0...4 - ² - ²	- ²	0...10 0...10 0...20	0...2 0...10 0...10
Погрешность измерений слоя, мм - воды - льда - снега	- ² - ² - ²	(0,2+0,2*Н) - ² - ²	- ²	0,5 0,5 0,5	(0,1+0,2*Нв) (0,1+0,2*Нл) (0,1+0,2*Нс)

¹ – метрологические характеристики приведены из руководства пользователя.

² – в описании типа средства измерения (СИ) отсутствуют метрологические характеристики на измеряемый параметр.

Во второй главе предложено уравнение зависимости отношения проводимостей сенсоров с различным расстоянием между электродами, дано графическое представление и их математическое описание. Приведены графики зависимости для образца дорожного датчика с расстоянием между электродами 3 и 6 мм. Оценена чувствительность отношения проводимостей

сенсоров к толщине измеряемого слоя и необходимая точность измерительного канала импеданса для достижения 10 % точности определения толщины слоя.

Разработаны функциональная и электрическая принципиальная схемы ДД. Предложен алгоритм определения градаций ВЛС.

В третьей главе описаны материалы и технология изготовления ДД. Рассмотрены результаты испытания по определению метрологических характеристик измерительных каналов изготовленного образца.

На основе лабораторных испытаний определены границы диапазонов принимаемых значений импеданса для форм существования воды. Сделан вывод о невозможности вычисления толщины льда из-за возникновения дефектов, нарушающих однородность слоя; показана необходимость адаптации геометрических размеров электродов к измерительному каналу в зависимости от удельной проводимости анализируемого вещества.

Приведены результаты лабораторных испытаний по определению метрологических характеристик измерения толщины слоя воды и соленого раствора различных концентраций. Оценен диапазон толщины слоя, в котором достигается высокая точность измерений, зависящая от расстояния между электродами, образующими широкий сенсор.

Предложено уравнение зависимости удельной проводимости от температуры и концентрации раствора поваренной соли, определена область существования твердой и жидкой фазы.

В четвертой главе сравниваются результаты натурных испытаний разработанного датчика с серийно-выпускаемой автоматической дорожной метеорологической станцией ROSA в составе с дорожным сенсором DRS511. Разработана методика подсчета и выполнен подсчет числа верного определения состояния поверхности. Показана необходимость применения дорожного датчика в составе автоматической станции с целью повышения вероятности верного определения состояния поверхности. Приведены

возможные изменения состояния дорожной поверхности в зависимости от текущих метеоусловий и предшествующего состояния поверхности.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Проведен анализ возникновения гололедно-изморозевых отложений, выделены метеопараметры наблюдение которых необходимо для определения существования и прогноза данных опасных явлений.

2. Проведен анализ развития инструментальных средств для наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями. Выполнен обзор дорожных датчиков, получивших наибольшее распространение на территории Российской Федерации – это датчики зарубежных производителей. Собственного опыта в серийном выпуске дорожных датчиков наша страна не имеет, хотя имеются разработки, и даже внедрение нескольких образцов.

3. Определены физические свойства, доступные для измерений непосредственно на дорожной поверхности, по величинам которых можно идентифицировать тип отложений. Выбрано и обосновано направление исследований по созданию контактного пассивного дорожного датчика.

4. Предложено уравнение зависимости импеданса сенсора от толщины слоя на его поверхности, данное уравнение применимо к сенсору любого размера, состоящего из плоскопараллельных прямоугольных электродов.

5. Разработана электрическая схема ДД, обеспечивающая точное измерение требуемых величин в рабочем диапазоне температур. Разработан алгоритм определения наиболее вероятного или наиболее опасного из вероятных состояний поверхности.

6. Разработана разборная конструкция ремонтпригодного датчика, отвечающая требованиям удобства эксплуатации (простоты ремонта и поверки в лабораторных условиях). Подобраны материалы, отвечающие жестким требованиям, диктуемыми условиями эксплуатации.

7. Проведены лабораторные испытания по определению точности измерительных каналов. Подтверждена их высокая точность, требуемая для анализа градации текущего состояния поверхности и вычисления толщины слоя воды.

8. Проведены лабораторные испытания и выполнены расчеты, определяющие границы диапазонов принимаемых значений измеряемых величин для градаций состояний поверхности. Подтверждена возможность вычисления слоя воды с приемлемой точностью на основе предложенного уравнения зависимости импеданса сенсора при использовании двух сенсоров с различными геометрическими размерами.

9. Определено, что дефекты, возникающие при кристаллизации воды, имеют неравномерный характер распределения по поверхности и как следствие – непредсказуемое поведение результатов при применении предложенного уравнения зависимости импеданса сенсора от толщины слоя на его поверхности.

10. Выявлено, что габаритные размеры сенсоров в исследуемом датчике не адаптированы к измерениям высококонцентрированных растворов соли. Показано, что границы диапазонов существования градации состояния при наличии примесей неизвестной концентрации не могут быть жестко заданы.

11. Установлена зависимость температуры замерзания раствора антиобледенительного реагента по удельной проводимости, применение которой, совместно с уравнением проводимости сенсора от толщины слоя позволяет определять текущее состояние поверхности.

12. В период с 29 января по 30 апреля 2013 года на территории ГГО были проведены натурные испытания. В качестве образцового оборудования была применена серийно выпускаемая автоматическая дорожная метеорологическая станция ROSA в комплекте с дорожным сенсором DRS511 фирмы Oy Vaisala.

13. Предложена и применена методика подсчета количества зафиксированных случаев существования состояний поверхности и апостериорной вероятности правильного определения состояния поверхности. За период испытаний было зафиксировано 16 состояний стабильного существования явлений с процентом правильного определения 62,5 %. Существование переходных состояний были зафиксированы в 29 случаях, для которых процент правильного определения составил 83,8 %.

14. С целью повышения вероятности правильного определения градации состояния поверхности предложено использовать ДД ФИРН1 в составе ИСГИО, а также алгоритмы анализа динамики развития состояния поверхности измерительной системы гололедно-изморозевых отложений в составе с дорожным датчиком ФИРН1.

Список публикаций по теме диссертации

1. Зименков П. С. Измерение толщины водосодержащего слоя дорожным датчиком. Труды ГГО. 2012. Вып. 566. С.223-233.

2. Зименков П.С. Патент № 2464580 от 06 мая 2011 г. на изобретение «Анализатор-измеритель состояния слоя воды/льда с примесями на дорожной поверхности». – Бюл. № 29, 2012.

3. Зименков П.С.. Исследование датчика гололедно-изморозевых отложений. Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С.268-276.