

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

А. А. Кузнецов Н. Г. Конопасов

М Е Т Е О Т Р О Н

Монография

В четырех книгах

Книга 3 (Дополнительная)

ЭКСПЕРИМЕНТЫ. РЕГИСТРАЦИИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.
АНАЛИЗ



Владимир 2020

УДК 551.5
ББК 26.231.8
К89

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор
профессор кафедры инфокоммуникационных технологий
Южно-Уральского государственного университета
(национального исследовательского университета)
В. И. Тамбовцев

Доктор физико-математических наук, профессор
профессор кафедры физики и прикладной математики
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. Г. Прокошев

Доктор технических наук, профессор
профессор кафедры биомедицинских и электронных средств и технологий
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Л. М. Самсонов

Кузнецов, А. А. Метеотрон : монография. В 4 кн. Кн. 3 (Доп.).
К89 Эксперименты. Регистрации. Моделирование. Анализ / А. А. Кузнецов,
Н. Г. Конопасов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. –
Владимир : Изд-во ВлГУ, 2020. – 256 с.
ISBN 978-5-9984-1088-8 (Кн. 3)
ISBN 978-5-9984-0575-4

Приведены результаты экспериментов по регистрации акустических и электрических полей вблизи пламени метеотрона. Представлены результаты статистического анализа данных и моделирования водно-капельного потока. Предложен алгоритм взаимодействия горизонтальной пароводяной струи и вертикальной струи метеотрона. Смоделирована принудительная электризация потока.

Результаты работы могут быть полезны для научных работников, аспирантов и магистрантов в области прикладных геофизических исследований.

Табл. 8. Ил. 65. Библиогр.: 216 назв.

УДК 551.5
ББК 26.231.8

ISBN 978-5-9984-1088-8 (Кн. 3)
ISBN 978-5-9984-0575-4

© Кузнецов А. А., 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Введение	8
Метеотронный комплекс «Атмосфера». Структура факела пламени. Вертикальные потоки и тепловая колонка. Исследование горизонтальной скоростной нагретой струи. Объекты и направления исследования.	
I. Опытные регистрации электрических и акустических полей при работе ТУМ	23
I.1. О возможных механизмах электризации в алгоритме трансформации топлива в продукты сгорания	23
Статическая электризация топлива. Баллоэлектрические явления. Образование сажи в пламени метеотрона. Классификация углеродных продуктов в пламени. Строение и структура сажевой частицы. Образование сажевой частицы в пламени. Условия образования и влияния. Поверхностные явления. Взаимодействие с парами воды. О механизмах электризации сажевых частиц. Поверхностная ионизация на аморфной саже. Разделение зарядов противоположного знака в ионных кристаллах. О влиянии электрического поля на нагретую струю продуктов сгорания. Формирование вертикальной электродинамической структуры. Пространственно-временные механизмы разделения электрических зарядов в пламени и струе.	
I.2. Регистрации электрического поля при работе ТУМ.....	39
Об условиях приема и методике обработки данных регистраций естественных вариаций напряженности электрического поля. Характеристики ФС. Регистрации электрического поля при работе ТУМ II. К определению знака электрического заряда пламени ТУМ. Электрические факторы зарядки транспорта струи ТУМ. Газодинамические и электрогазодинамические факторы нагретой вертикальной струи ТУМ. Мультипликативный эффект воздействия при работе ТУМV.	
I.3. Регистрации акустического поля при работе ТУМV	60
Источники акустических колебаний диапазона частот ниже 20 Гц. Источники аэродинамического шума. Акустическое поле факела и струи метеотрона.	
I.4. Результаты комплексных экспериментов	63
I.4.1. Регистрации электрического поля вдали от ТУМV	63
Обоснование опытов, методика проведения, результаты и обсуждение.	

I.4.2. Регистрации электрического поля вблизи ТУМV..... 68
Комплексный эксперимент (31.10.1981) Обсуждение результатов опыта 31.10.81. Объемный способ генерации инфразвуков. Метеотрон как источник коррелированных акустического и электрического полей. Влияние разномасштабных вихревых и потенциальных течений на условия генерации и приема. Результаты регистрации под землей и под водой.

II. Опытное моделирование увлажнения и зарядки струи..... 120

II.1. Характерные условия пограничного слоя атмосферы при стимулировании образования тумана 120
Некоторые характеристики приземного аэрозоля. К оценке натурной электризации капель воды.

II.2. Анализ вариантов увлажнения вертикальной нагретой струи метеотрона..... 124
Проекты интенсификации электрической зарядки струи.

II.3. Эксперименты по генерации водного аэрозоля 131

II.4. Вертикальный транспорт водяного пара нагретой струей метеотрона до уровня слоя инверсии..... 136

II.5. Электрические процессы в струях метеотрона и ТРД..... 139
Горизонтальная нагретая струя ТРД. Конвекционный ток нагретой струи метеотрона.

III. Лабораторное моделирование генерации электрически заряженных водно-капельных потоков 143

III.1. Моделирование потоков электрических зарядов 143
Постановка задачи. Моделирование водно-капельных потоков. Методика регистрации и оценки размеров капель в потоке. Статистические параметры капельных следов. Логарифмически-нормальное распределение диаметров капель в водно-капельном потоке. Моделирование электрической зарядки капель в вертикальной пароводяной струе. Электризация потока коронным разрядом. Моделирование электризации потока электрогазодинамическим генератором. Транспортировка электрического заряда воздушно-капельным потоком. Моделирование капельно-пузырькового потока. Эффективность электризации носителей разной подвижности. Электризация нагретой струи ТУМV.

IV. Физические модели и количественные оценки.....	178
IV.1. Газодинамическая модель нагретой струи метеотрона	178
Динамические характеристики нагретой вертикальной струи. Модель Мортонна – Тейлора – Турнера (МТТ). Модель Качурина.	
IV.2. Моделирование аддитивных факторов влияния на Ez-составляющую электромагнитного поля вблизи факела пламени и струи метеотрона	184
Факторы влияния ТУМ. Модель «заряженного листа». Электродинамическая модель. Электростатическое поле пламени метеотрона. Анализ перехода к функции тепловыделения или интенсивности горения по реализации переменного давления подачи топлива. Электрическое поле пламени на переменном режиме работы ТУМ. Модель вертикального ионно-конвекционного генератора. Система уравнений факторов влияния работы метеотрона на локальное электрическое поле в области приема.	
IV.3. Метеотрон – источник акустических колебаний.....	211
Общая характеристика и тип источника. Оценки акустической мощности и давления теплового источника.	
Заключение	217
Обозначения и сокращения авторов	220
Приложения	223
Приложение 1. К опыту по определению знака излучателя E-поля.	
Приложение 2. Масштабированные копии участков диаграмм записи 31.10.81	
Приложение 3. Функция вариативности расхода пульверизатора.	
Приложение 4. Функция вариативности расхода воды пульверизатором.	
Приложение 5. Влияние формы капли на размер при осаждении на парафиновой подложке в гравитационном поле.	
Библиографический список	232

Предисловие

В третьей книге, как и в двух первых, использованы материалы авторских диссертационных работ на соискание ученых степеней докторов физико-математических наук, которые не смогли быть реализованы в 90-х годах по совокупности субъективных и объективных причин (иногда грустных, иногда смешных), вплоть до «банальных» утерь печатных форматов диссертаций в «системе ВАК». Обе диссертационные работы имели общую тему – исследование устойчивых признаков и закономерностей воздействия факелов пламени и нагретых струй на физические поля, близкие исследовательские цели при разных акцентах. Работа Н. Г. Конопасова была акцентирована на постановке и проведении всестороннего системного эксперимента, а работа А. А. Кузнецова – на обработке экспериментальной информации в форматах графических записей с сопутствующим аналитическим поиском механизмов генераций физических процессов для идентификации их источников.

Книга 3 является дополнением и естественным продолжением двух первых книг и написана с сохранением ранее принятого стиля изложения. Она содержит результаты регистраций газодинамических, электрических и акустических колебаний в приземном слое атмосферы вблизи факела пламени метеотрона и нагретой вертикальной струи. По результатам спектрального и корреляционного анализов предложены механизмы формирования локальных физических полей при работе пятой модификации тепловой установки метеотрон пятой модификации (ТУМV). Авторы сочли необходимым во введении представить краткие характеристики и сопутствующие его работе эффекты, ранее раскрытые в [1, 2].

Первая часть книги посвящена электрофизическим процессам электрической зарядки нагретой струи. Здесь же представлены регистрации электрических полей в крайне-низкочастотном диапазоне (КНЧ) при работе ТУМII и ТУМV. По данным отдельных комплексных регистраций проведен первичный анализ механизмов генерации полей в КНЧ диапазоне и представлены аддитивный и мультипликативный порядок их формирования. Предложена ин-

формация об акустических колебаниях при работе ТУМВ в диапазоне частот ниже 20 Гц, задевая геоакустический диапазон, с последующим сопоставительным статистическим и спектральным анализом электрических и акустических колебаний в рамках прогнозного поиска и последующего анализа характеристик общих источников генераций. Приведены постановочные данные и полное описание трех комплексных опытов по синхронной регистрации акустических и электрических вариаций в ближнем и дальнем физическом поле на разных режимах работы метеотрона.

Во второй части книги представлен экспериментальный материал по моделированию процессов увлажнения нагретой «сухой» струи, электрической подзарядки капель воды на выходном сечении турбореактивного двигателя (ТРД) и введения ее в нагретую вертикальную также «сухую» струю метеотрона. Показаны потенциальные возможности подзарядки нагретой струи метеотрона, с открытием возможности аккумуляции электрического отрицательного заряда выше уровня инверсии. Далее в третьей части приведены постановочные данные и результаты разноплановых экспериментов моделирования процессов генерации водно-капельных потоков с масштабным приближением модельных процессов к реальным, полевым при работе комплекса «Атмосфера», электризации потоков и моделирования электрогазодинамических процессов.

В четвертой части авторами рассмотрены и проанализированы модели вертикальных нагретых струй и предложена система электрогазодинамических уравнений причинно-следственные отношений между нагретой электрически заряженной струей метеотрона и электрическим полем. Предложены оценочные характеристики источников генераций акустического поля и модельные графические формы результирующих электрических сигналов.

Дополнительная и пояснительная информация, а также некоторые графические и расчетные оценки вынесены в приложения. В библиографическом списке приведены основные работы авторов, на основе которых сформировано содержание книги 3 монографии.

Введение

Метеотронный комплекс «Атмосфера». Экспериментальные исследования эффектов влияний на атмосферу и нижние слои ионосферы давно вышли за рамки лабораторий и обрели характер активных воздействий на атмосферные процессы. К ним относится тепловой способ воздействия на приземный слой атмосферы и исследования откликов такого воздействия в формах длинноволновых вариаций параметров физических полей: акустических, электрических и микроклиматических. Изучение воздействия ТУМ на естественное электрическое поле в крайне-низкочастотном (КНЧ) диапазоне [1 – 3] обычно начинается с достоверного определения характера помеховой обстановки, на которую большое влияние оказывают естественные процессы в пограничном слое атмосферы: развитие и движение грозových облаков, восходящих потоков, ветер, дождь, снег, туман, изменение влажности и т.д. [4, 5]. Системная энергия этих процессов чрезвычайно велика, но при благоприятных условиях неустойчивости атмосферы в части ее готовности к их протеканию, мощности порядка миллиона киловатт может стать достаточной для провокации на зарождение и стимулирования развития указанных процессов [5]. Далее работа по формированию устойчивых высокоэнергетических атмосферных процессов за счет запаса потенциальной энергии неустойчивости может придать им естественную необратимость. Авторам в указанном смысле атмосфера представляется аналогом патрона с порохом, а искусственное воздействие метеотрона – аналогом удара по капсюлю.

Метеотронный комплекс «Атмосфера» состоит из тепловой установки метеотрон ТУМV [6] и автономной системы генерирования и подачи пароводяного аэрозоля в область вовлечения активного участка вертикальной струи метеотрона. Полное и подробное описание комплекса и основных объектов исследования: факела пламени и нагретой струи продуктов сгорания дано в книгах 1, 2 [1, 2], но для удобства читателей авторы вынесли во введение основные характеристики и краткое наглядное описание объектов.

Тепловая установка размещена на площади 2000 м^2 по необходимости разнесения на значительные расстояния (более 50 м) пламени и топливной емкости. Авиационный керосин ТС-1 с технологической присадкой калия (до 4 кг/м^3) открыто сжигается в атмосфере на горелочных устройствах ТУМ модификаций II – VI [1, 7 – 9]. Расчетная максимальная тепловая мощность тепловыделения при работе установки на номинальном режиме равна $0,4 \cdot 10^9 \text{ Вт}$. Номинальный режим работы ТУМV задан постоянным перепадом давления 10 МПа на форсунках и суммарным расходом топлива $8,8 \text{ кг/с}$ (рис. 1). Нагретая вертикальная струя бездымная.



Рис. 1. Составной факел пламени на номинальном режиме работы ТУМV

Давление топлива измеряется на выходе насосов высокого давления с помощью стрелочных манометров и регистрируется на ленте самописца – 16-канального электроэнцефалографа типа ЭЭГУ 16-02. Пульт управления отнесен от ТУМV на расстояние более 30 м. Реализуемые режимы работы: стационарный и переменный, с меняющимся по заданному закону давлением подачи топлива на

форсунки горелочных устройств. Стационарный режим работы визуально определен оптимальной огневой связью между форсуночными факелами, минимальной задымленностью струи продуктов сгорания и максимальной сплошностью составного факела пламени. При этом начальный радиус активного участка нагретой струи составляет не менее 6 м, средняя вертикальная скорость продуктов сгорания не ниже 30 м/с [1, 2, 6, 9]. В начале струи поток продуктов сгорания прозрачно-белесого цвета заряжен отрицательно в результате превалирующего процесса положительной поверхностной ионизации атомов калия на частицах сажи в составном факеле пламени [2, 10].

Для электризации струю целесообразно задымлять или вводить мелкие частицы, способные служить транспортом зарядов [11]. При полном сгорании топлива в восходящий поток нагретых продуктов сгорания вводится вода. Для этого была создана система подачи и ввода воды в вертикальную нагретую струю ТУМВ [12]. В опытах по электрической зарядке струи, стимуляции развития туманов, облаков и разрядов молний в восходящий поток вводилось до 100 кг/с пароводяной смеси, образующейся при распылении воды струей турбореактивного двигателя (ТРД) типа ВКІА. Система генерирования и подачи пароводяной струи и транспортировки его в нагретую струю метеотрона состоит из ТРД, системы обеспечения его работы, системы водозабора, насосной станции и контрольно-измерительной группы приборов [1, 2, 13]. От водозаборника с фильтром и обратным клапаном в озере на расстоянии 180 м от тепловой установки по трубам диаметром 240 мм вода поступала на вход насосной установки СНП – 120. Далее, с выхода насоса через задвижку – в эжектор, турбореактивного двигателя марки ВК-1 (рис. 2) на высоту 3 метра от поверхности земли [1].

При работе установки образуется плотное непрозрачное туманное облако, бесконтактно стелящееся по поверхности земли на расстоянии 0,2 – 0,5 м. С выключением ТРД образование постепенно обретает прозрачность без видимого оседания [1, 9, 12].



Рис. 2. Компьютерная версия фотографии распылительного узла ввода воды в струю ТРД

Структура факела пламени. Горелочные устройства тепловой установки метеотрон пятой модификации (ТУМV) предназначены для открытого горения авиационного керосина марки ТС-1 с формированием мощной нагретой вертикальной струи продуктов сгорания. Они представляют два линейных трубопровода (плети) с внутренним диаметром 60 мм и длинами 11 м и 6 м, расположенными под уклоном для технологического слива топлива. По длине большой (11 м) и малой (6 м) плети распределены по 11 и по 5 пар форсунок, соответственно [1]. При том, что каждая форсунка имела на конусной части по шесть отверстий диаметром 0,8 мм, то общее выходное сечение по форсункам большой плети 66 мм^2 , а малой – 30 мм^2 , при площади сечения плети 2850 мм^2 . Первые минуты работы ТУМV внутренняя площадь сечения большой и малой плети и суммарное сечение каналов форсунок на них соотносятся как 50:1 и 110:1 при условном одном неработающем (закрытом) каналом на форсунке и с начальной несогласованностью по расходам на выходе из форсунок по длине плети. При факельном зажигании максимум по расходу приходится на начальные форсунки.

Скрученный и смоченный в керосине асбестовый шнур зажигается и устанавливается вблизи первой форсунки малой плети в качестве факела поджига. С пульта управления от двух насосов с расходом топлива 6,02 л/с и 3,4 л/с на форсунках большой и малой плети, автономно и соответственно, за 1 с устанавливается давление 0,8 номинального. «Холодная» топливовоздушная смесь в форме топливного туманного облака аэрозоля «зависает» на плетях. Факельное зажигание происходит с запаздыванием. Вообще формирование объемного горения наступает не сразу. Подверженным воспламенению оказывается топливный туман от первой форсунки на обеих плетях. Оценим движение фронта пламени вдоль плети к последним форсункам за 0,1 – 0,2 с, а воспламенение подготовленного облака – побольше: за 0,2 – 0,3 с. При этом общее начальное запаздывание при переходе от гидродинамических характеристик к газодинамическим может превышать 3 с в зависимости от переменного качества контакта пламени факела поджига и топливного облака, которое может просто сносить порывами ветра. Последующее повышение давления до номинального значения сопровождается формированием составного факела, т.е. факела составленного пересечением множества форсуночных факелов. Разогрев материала плетей приводит к вскипанию топлива внутри плетей, и далее, к росту и выравниванию давления по их длине с выходом паро-топливной смеси с относительно постоянной плотностью ρ_t [1]. При этом обычно прогреваются и «включаются» все каналы на конусных гранях форсунок [1], организующие сильно приподнятые струйные факела, замыкающие составной факел в сплошную пламенную структуру, заполняя собой просветы между мощными, но и более гетерогенными пламенными факелами от осевых составляющих каналов форсунок (рис. 1, 3). Внутреннее сечение плетей и суммарное сечение каналов форсунок падает до 40:1 и 90:1 (см. выше). Это заметно сглаживает разницу в расходах форсунок по длине плетей, позволяя далее форсуночные пламенные факела характеризовать средними расходными и скоростными величинами по длине.



Рис. 3. Факел пламени ТУМВ через 5 – 7 минут от начала работы: вид на «фокус факела».

При полном сгорании топлива сплошной факел пламени объемного горения «висит» на штативах конструкции горелочных устройств (рис. 3). Пламя объемом $(0,8 - 1) \cdot 10^3 \text{ м}^3$ и высотой 10 – 12 м в зависимости от условий приподнято над поверхностью земли на 4 м от нижней кромки [1, 9].

Обычному созерцателю в течение первых 10 минут работы ТУМВ на расстояниях более 50 м составной факел пламени видится сплошным эллипсоидным объемом (см. рис. 1). Условные боковые поверхности эллипсоида организованы (составлены) пересекающимися шаровыми факельными «головками» горячей гетерогенной топливной смеси (рис. 3) грязно-красно-желтого цвета. Горение сильно турбулизированное, диффузионное, визуальное бездымное. Чем ниже, тем гуще и темнее оттенки красного. Чем выше, тем

светлее оттенки красного, переходящего в желтый цвет, и далее, на верхушке, цвет теряет все оттенки, становясь прозрачно-белесым. Именно эта область максимальной, близкой к стехиометрической, температуры естественно формируется между плетью горелок (рис. 3) как область догорания и условно принимается за начальную область формирования и активного участка нагретой струи продуктов сгорания, и радиационного конуса – тепловой статичной колонки мощного инфракрасного излучения, определяемого визуально только по температурной рефракции. Резкое повышение температуры при формировании области догорания приводит к столь же резкому и пропорциональному падению плотности продуктов сгорания. Дополняет «картину» то обстоятельство, что указанная область сильно приподнята (до 10 м). Все это в сочетании приводит к организации сильнейшей «вертикальной тяги», фиксируемой от нагретой поверхности земли. По этому признаку возникает каминный эффект формирования «фокуса» активного участка и излучения в форме рефракционного конуса с конформным отображением мнимой вершины. Проекция указанной области площадью ~ 140 м² на нагретую поверхность земли показана на задней обложке книги, а также в черно-белом формате рис. 15 книги 1 [1].

Представление «лепестка» диаграммы направленности радиационного излучения с формированием конической поверхности и удобно, и реально с учетом отражения излучения от поверхности земли и конструкционных особенностей горелочных устройств [1]. Экстраполяция области догорания, как основания конической поверхности позволяет определить местоположение точечного «мнимого источника». Именно этим приемом авторы воспользовались при формировании газодинамической модели Мортон – Тейлора – Турнера (модель МТТ [14]) для стратифицированной атмосферы в применении к факелу ТУМВ (см. далее раздел IV.1). По результатам облета струи на вертолете МИ-2 [1] в пасмурную осеннюю погоду пассивный участок струи метеотрона на высоте 800 м имел горизонтальную протяженность около 200 м.

Вертикальные потоки и тепловая колонка. Расчет по методу МТТ для стратифицированного слоя атмосферы [14], позволил оценить предельную высоту 1,5 км по вертикали положительной плавучести нагретой струи (см. далее раздел IV.1) на стационарном режиме работы ТУМВ.

Коаксиальное одновременное и однонаправленное по вертикали формирование из области догорания высокотемпературного радиационного и низкотемпературного массового потоков тепла и продуктов сгорания, соответственно, приводит к естественному развитию газодинамической неустойчивости. Процесс радиационного прогрева локально выделенной колонки приземного слоя атмосферы сопровождается переносом нагретых массовых частиц в пределах этой же локальной колонки. Факел пламени является направленным источником теплоты и вещества. При постоянном атмосферном давлении в пламени (немного меньше) и в окружающей среде устанавливаются балансные отношения: возобновляемые количества теплоты и массы равны выносимым из объема источника количествам теплоты и массы. В этот момент формируется объемное горение с заданной формой и величиной поверхности объема (см. рис. 1) и радиальный приток воздуха с двумя преимущественными по расходу направлениями притока: первый – снизу-вверх по «вертикальной тяге»; второй – в направлении на «фокус» между плетями горелок ТУМВ (см. рис. 3) [1, 6 – 9].

Два ортогональных воздушных потока с разной температурой встречаются в распределенной области вовлечения в начале активного участка. Рождение и развитие тангенциальных составляющих скоростей продуктов сгорания приводит к появлению участка спиральности и массовых центробежных эффектов. На определенной высоте поперечные размеры струи начинают расти с большей скоростью, чем это позволено массовым расходом. При гипотетическом геометрическом совпадении по текущей высоте нагретой струи и рефракционного конуса, вероятно, можно признать, что на значительных высотах, струя как бы «забывает» форму источника (обретает автомодельность). В этом смысле удобно говорить об эк-

вивалентном радиусе около 9 м [7, 10] источника. Такого рода процессы приводят к изменению формы распределения вертикальных составляющих скорости по сечению. На тех же высотах с положительной плавучестью верхних слоев нагретой массовой струи начинает конкурировать процесс разряжения в приосевых областях рефракционного конуса. Тепловой поток «экранируется» раскрывшейся нагретой струей. Рефракционный вертикальный конус над ней исчезает. Распределение вертикальных составляющих скоростей по сечению колонки становится плоским, а затем меняет знак – «проваливается». В приосевых областях развиваются нисходящие потоки. Нагретая струя продуктов сгорания перестает набирать высоту, раскрывается и играет [2]. Описанное модельное представление вертикальных потоков при работе ТУМ практически не выполнимо даже при полном штиле. Уже на малых высотах «включается» ветровой сдвиг (чаще – в сторону «розы ветров»), и ось активного участка струи деформируется изгибом, обретая форму пассивного участка вне пределов тепловой колонки.

Авторы много раз наблюдали устойчивый красный отблеск на низкой облачности. Насыщенность красного цвета возрастала к вечеру при потемнении. Общее впечатление было как при большом пожаре. Поэтому не раз поначалу жители соседней деревни (около 1 км) бегом или на мотоциклах с ведрами появлялись около экспериментального полигона с одной целью – погасить пожар. Когда они появлялись и (извините) тарачились на нас, мы выключали установку. Один из рецензентов (проф. Самсонов Л.М.) проезжая по «Пекинке» – дороге Владимир – Н. Новгород также наблюдал сильное зарево над дорогой (на расстоянии 2 км от установки). Авторы не исследовали распределение интенсивности и спектральный состав излучения в вертикальном направлении, однако, косвенные показатели налицо. С одной стороны отсутствие визуально зарева днем и появление при потемнении указывает на длины волн на уровне и немногим выше правой границы видимого света. С другой стороны при распространении зарева по нижней кромке облачности на нескольких километрах, «дырка» в облачности выжигается стро-

го над установкой [2]. Оценки ее размеров и области догорания позволяют оценить угол раскрытия теплового конуса около 20° . Абрис прозрачно-белесого конуса температурной рефракции наблюдался авторами визуально и отчетлив на некоторых фотографиях струи ТУМ, снятых с борта вертолета [2]. Вероятно, радиационная тепловая колонка – фактор прямого воздействия на атмосферные объекты, а зарево – фактор отраженного действия.

Расчетное время формирования тепловой колонки оценивается в 160 с от момента начала работы ТУМВ [11, 12]. Формирование макроциркуляционной зоны [2] начинается практически сразу с появления и развития участка спиральности на активном участке струи продуктов сгорания, приводя к устойчивому направленному притоку воздуха в составной факел пламени. С этого момента расход воздуха к основанию факела только нарастает, но поступает не радиально, а тангенциально. При росте избытка окислителя температура пламени в факеле нарастает. Нарастает и нагрев самих плетей. Топливо начинает поступать в факел не в виде гетерогенной смеси с воздухом, а в виде гомогенного перегретого пара. Струйные пламена формируются уже иными, большими начальными перепадами давлений и, удаляясь от источника, растут в продольном размере. Приподнятые струйные пламена уменьшают шаровые головки, размыкая сплошную поверхность и нарушая режим объемного горения. Сплошные боковые поверхности составного пламени ТУМВ, раздвигаются, «фокус» факела исчезает [7 – 9], а область догорания распределяется по составляющим разнонаправленных, сильно приподнятых форсуночным факелам (рис. 4).. При больших расходах воздуха системную ветровую картину газодинамических потоков усложняет местный рельеф постоянного малого уклона - $3,4/400$ град/м [1]. Переход от радиального к тангенциальному расходу окружающего воздуха фиксируют датчики на метеомачте [1, 2] динамикой результирующего вектора скорости: порывистой, меняющейся резко, непрогнозируемой по величине и направлению.

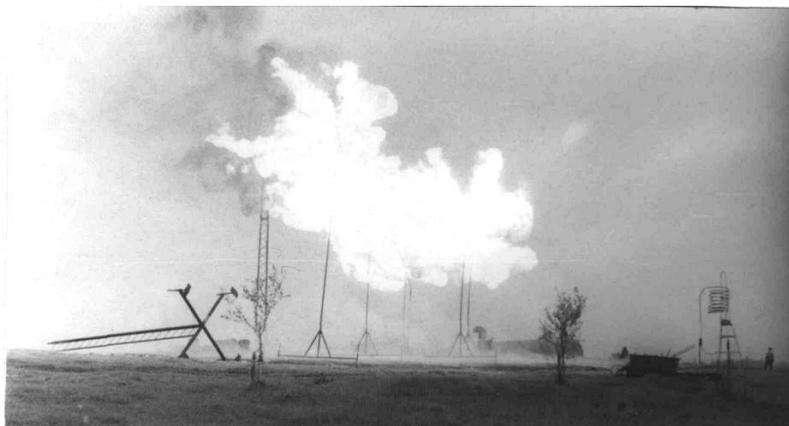


Рис. 4. Компьютерная версия фотографии работы ТУМВ через 15 – 20 минут работы на номинальном режиме. Окончание формирования циркуляции скорости воздуха в окружающем пространстве

При установлении циркуляции вектора скорости с замыканием воздушных потоков вокруг ТУМ, исходные метеоусловия восстановить непросто. Теперь работа метеотрона обеспечивает устойчивость заданной ветровой обстановки. Рост интенсивности закрутки приводит к «переформатированию» массовой нагретой струи оседанием и ростом начального сечения с замыканием на «поверхность земли». При этом начальная приосевая скорость продуктов сгорания падает, а объем пламени теряет сплошность «сверху» - оседанием (провалом) начального сечения с замыканием с приповерхностным циркуляционным течением.

Таким образом, составной факел пламени метеотрона и его нагретая струя имеют признаки эволюции: устойчивый сплошной факел, формирующий активный участок нагретой вертикальную струю и тепловую колонку ($t_0 < t < t_1$); вертикальная помпа, создающая большие вертикальные скорости ($t_1 < t < t_2$) с потерей цельности вертикальным градиентом давлений при $t_2 < t$ на составляющие форсуночные факела.

Исследование горизонтальной скоростной нагретой струи.

Горизонтальная скоростная струя продуктов сгорания генерировалась при работе турбореактивного двигателя (ТРД) типа ВКІА (рис. 5), работающего на том же топливе (ТС-1), что и ТУМV. Сгорание в камере сгорания полное, нагретая струя бездымная, обнаруживается по рефракционному следу.

При исследовании струи ТРД синхронно регистрировались следующие физические параметры: скорость v , температура T и ток i с ионометра в потоке, ток с двигателя I , напряженность E электрического поля.

По полученным распределениям осредненных по времени указанных функций в пространстве струи и вне ее в зависимости от режима работы двигателя при изменении числа оборотов n компрессора от 0 до 6000 об/мин анализ результатов установил следующие закономерности [15, 16]:

1. По приемнику E_z -составляющей электрического поля (вертикальный не симметричный диполь типа «штырь» с высотой антенны 1 м [1]):

1.1. В промеренном интервале расстояний $r = 10 - 100$ м от оси струи напряженность $E_z = 0,7/r$, В/м;

1.2. Вдоль оси Ox струи на расстояниях до шести диаметров напряженность E_z -составляющей электрического поля резко растет;

2. По приемнику T (термопара ХА): распределение температуры по промеренным сечениям струи изотропное и характер распределения не зависит от режима работы двигателя;



Рис. 5. Фото ТРД типа ВКІА в рабочем состоянии эксплуатации с емкостью (на заднем плане) для топлива ТС-1

3. По приемнику скорости v (трубка Пито – Прандтля и стандартный измеритель скоростного напора типа ДАС):

3.1. При росте числа оборотов n компрессора осевая скорость v потока растет нелинейно. Динамика функции $v(\tau, n)$ не стационарная;

3.2. Характер распределения скорости $v(R)$ потока по сечению струи сильно зависит от режима работы двигателя: на малых оборотах n компрессора – относительно однородный; с ростом n кривая распределения $v(R, n)$ усложняется характерным появлением и усилением минимума в приосевой области сечения с медленным смещением к соплу. Распределение можно характеризовать во всех рассмотренных случаях (при любом n) близким к симметричному относительно оси сопла.

4. По току I с двигателя: с увеличением числа оборотов n компрессора ток I с корпуса двигателя монотонно растет;

5. По приемнику тока с ионометра (трубка Пито):

5.1. В интервале исследуемых режимов работы двигателя характер распределения $i(R, n)$ по сечению струи не меняется. С увеличением n происходит однократное изменение знака электрического заряда в приосевой области струи. Обратной смены знака заряда при дальнейшем увеличении n не наблюдалось;

5.2. На стационарной точке приема с ростом числа оборотов n компрессора ток с ионометра $i(\tau, n)$ меняет знак как минимум дважды. При стоке положительных избыточных зарядов через ионометр, функция $i(n)$ ведет себя сильно нелинейно.

Горизонтальная нагретая скоростная струя продуктов сгорания бездымна, термодинамически однородна и генерирует слабое электростатическое поле. С увеличением числа оборотов компрессора двигателя положительная и тесная корреляционная взаимосвязь распределений по сечению струи скоростей и токов с ионометра упрочняется, появляется и усиливается закрутка струи, предопределяющая разделение в ее объеме электрических зарядов по знаку, предположительно с инерционным (массовым) характером.

Объекты и направления исследования. Многофакторность процессов факельного гетерогенного горения предопределяет необходимость одновременного исследования газодинамических, электрических и акустических процессов в окружающем пространстве с учетом постоянного и переменного давления подачи топлива на форсунки. На стационарном номинальном режиме работы установки, т.е. при постоянном давлении топлива на выходе из форсунок 100 атм, порядки средних амплитудных уровней этих процессов: 10 м/с, 100 мВ/м, 100 дБ, соответственно [17]. При исследовании распределенных динамических массовых процессов в форме генерируемых динамических макрообъектов (факела пламени, восходящей нагретой струи, макро-циркуляции в пограничном слое атмосферы) и радиационного конуса тепловой колонки следует учитывать метеословия и реакцию приземного аэрозоля.

Естественные процессы электризации капель топлива в разной степени обеспечивают в объемах форсуночных факелов ТУМ наличие избыточного электрического заряда определенного знака [2, 13]. Эти процессы, как правило, сопряжены с наличием воды в топливе и разномасштабными газодинамическими явлениями и конвекционными потоками электрически заряженных частиц влаги, отожженной (не отожженной) пыли и сажевых частиц продуктов сгорания. Естественная вариабельность напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы напрямую определена процессами образования, разделения и текущего пространственного перераспределения ионных зарядов по величине и знаку. Макромасштабы генераций электрических процессов выделяют диапазон КНЧ в условных пределах 0,01 – 100 Гц и соответствующий ему диапазон инфразвука при акустических регистрациях.

Экспериментально реализованный в полевых условиях технологический алгоритм в первой серии опытов с системой генерирования, подачи и транспортировки пароводяной струи в нагретую струю метеотрона в попытке увеличить электрическую заряженность струи вызвал существенное задымление и не позволил сохранить ее вертикальный механический импульс. Однако, уже в после-

дующих опытах было показано, что введение пароводяной смеси в область вовлечения активного участка струи метеотрона является технологически эффективной процедурой усиления электризации струи. Отсюда и появилась условность подразделения струи на сухую и влажную: при работе метеотрона генерируется сухая струя, а при работе комплекса «Атмосфера» – влажная (рис. 6). Кроме этого стало понятно, что электрическим зарядам нужен транспорт: сажевые частицы и капельки пара. И если увеличить число носителей малого размера и малой подвижности, то можно провести и их принудительную электризацию преимущественно одного знака – отрицательного.

Следует признать, что в процессе работы авторам удалось лишь несколько раз пробить слой инверсии и зафиксировать эти события интенсивным процессом конденсации в форме облачного следа «по ветру». При этом низкая развитая облачность сухой струей пробивалась достоверно неоднократно и последовательно.



Рис. 6. Работа комплекса «Атмосфера» в режиме генерации влажной нагретой вертикальной струи

I. Опытные регистрации электрических и акустических полей при работе ТУМ

I.1. О возможных механизмах электризации в алгоритме трансформации топлива в продукты сгорания

Статическая электризация топлива. Статическая электризация охватывает процессы, ведущие к пространственному разделению положительных и отрицательных электрических зарядов в результате механической деформации при столкновении или контакте поверхностей твердого тела и жидкости, и при разрыве или отделении поверхностей жидкости газами или, в частности ионизированными газами [18]. К физическим процессам статической электризации в алгоритме трансформации авиационного керосина марки ТС-1 от емкости для хранения и до продуктов сгорания в нагретой струе метеотрона [1, 9] в разной мере относят [18]:

1. Электролитические явления, связанные со свободными переходными движениями ионов;

2. Электризация при разрывах поверхностных пленок диэлектрических жидкостей механическими силами при разбрызгивании жидкостей (баллоэлектрические эффекты);

3. Электризация разделением малых капелек жидкости друг от друга с образованием частиц, несущих равные по величине, но противоположные по знаку заряды с соблюдением постоянной нейтральности всей системы;

4. Электризация ионизацией и разделением электрических зарядов при горении в пламени;

5. Электризация механическим отделением поляризованных слоев для тонких водяных пленок и жидкостей при поляризации диэлектриков во внешнем поле. Обратный процесс на клеммах электрических батарей и аккумуляторов можно регистрировать даже в воздухе при атмосферном давлении с повышенной влажностью. Приход и уход капелек паров воды обеспечивает непрерывный съем заряда с поляризацией молекул воды.

6. Электрический разрыв капель при аккумуляции электрического заряда более критического (по Релею).

7. Электризация в потоке жидкости при заборе авиационного керосина ТС–1 из емкости 120 м³ в магистраль посредством ракетного рукава, соединяющего насос низкого давления с насосом высокого давления, а также в насосе высокого давления с тепловыми элементами установки метеотрон. Однако механизм обратной утечки зарядов нивелирует возможности данного способа пространственного разделения зарядов для диэлектриков с малым удельным сопротивлением, каким является керосин. Даже если учесть наличие воды с удельным сопротивлением до $\rho = 10^6$ Ом·м [19], то и этого окажется мало. Утверждается [18], что для проявления этого механизма требуется текущий в изолированной металлической трубке диэлектрик с $\rho > 10^{12}$ Ом·м. Для этого требуется специальная физическая и химическая очистка [20].

Предыдущий вывод перестает быть справедливым в том случае, когда для удаления ионов электролита используют капиллярные трубки [18]. В нашем случае их роль выполняют форсунки. Капли жидкости с большой диэлектрической проницаемостью, стекающие с поверхности металла, уносят с собой электрический заряд, и отталкиваются друг от друга, так как захватывают заряды одного знака [21]. Само заряджение имеет электролитический характер и обусловлено растворенной в керосине подкисленной водой и ослаблено благодаря утечкам.

Баллоэлектрические явления. Явления сильной электризации при разбрызгивании воды, бензина и аналогичных жидкостей [18] с пространственным разделением противоположных зарядов получили название «баллоэлектрических» эффектов (см. выше п. 2). Регистрируемые величины разности потенциалов имеют макроскопические значения и не сводятся к флуктуационному механизму теплового движения микроскопических масштабов [22].

В верхнем слое свободной поверхности жидкости с высокой диэлектрической проницаемостью благодаря действию поверхностных сил возрастает концентрация электронов и отрицательных

ионов с образованием поверхностного конденсатора молекулярной толщины с разностью потенциалов около $0,25V$ (в случае воды) [22]. Молекулы воды ориентированы своими положительными гидрофобными концами внутрь, обуславливая положительный потенциал внутри капли (при равенстве его нулю снаружи), то положительные ионы будут стремиться выйти наружу, а отрицательные – втянуться внутрь капли, образуя здесь диффузный слой того же типа, что при адсорбции ионов (поверхностная ионизация) [18, 21 – 24]. В результате наружный отрицательный слой «ориентационного» конденсатора практически компенсирован на самой поверхности капли; внутренний же слой, отстоящий от наружного на расстоянии двух-трех ангстрем, компенсирован диффузным отрицательным, простирающимся вглубь слоем. Так, благодаря тепловому движению заряженных частиц в ионном кристалле или в капле полярной жидкости на поверхности тела возникает двойной слой с плоской наружной обкладкой и диффузной внутренней, обладающей значительной толщиной δ [22]. Налицо все предпосылки для электризации данного тела при его распылении или разбрызгивании. Если при разбрызгивании и барботаже от сплошного объема отделяются частицы с линейными размерами меньше δ , они должны иметь знак электрического заряда наружная обкладки покрывающего это тело конденсатора, а остающаяся, более крупная масса, получает электрический заряд противоположного знака, совпадающего со знаком заряда «диффузного» слоя [2, 22].

Если разбрызгивание происходит в восходящем потоке воздуха, то более мелкие частицы увлекаются им вверх, а более крупные выпадают, благодаря чему в верхушке нагретой струи обнажаются заряды одного знака, а в основании – заряды противоположного знака. При гравитационном разделении электрических зарядов, предварительно отделенных друг от друга, в процессе разбрызгивания в восходящем потоке основную роль в пространственном разделении зарядов играет сила тяжести; восходящее движение воздуха лишь обеспечивает дифференциальное действие ее на мел-

кие частицы, которые согласно закону Стокса опускаются по отношению к воздуху медленнее, чем крупные частицы [22].

Самые мелкие капли воды, взвешенные в газовой среде всегда отрицательны, а остаточные более крупные капли – положительны. Баллоэлектрический эффект тем больше, чем больше перепад давления при разбрызгивании, т.е. чем меньше размеры брызг. При обдувании каплей потоком воздуха интенсивность заряжения возрастает в 2 – 3 раза. В этом и состоит основное отличие электризации при разбрызгивании и распылении от электролитических процессов, при которых заряд капли может иметь любой знак и мало зависит от размера капли [18].

Баллоэлектрический эффект может изменить свой знак на противоположный в зависимости от знака скачка потенциала, создаваемого адсорбированными мономолекулярными слоями поверхностно-активных веществ. Но знак заряда мелких брызг всегда противоположен знаку заряда наружной стороны адсорбированного мономолекулярного слоя. Размеры образовавшихся капель могут быть изменены последующим испарением, или конденсацией, или при разрыве падающих капель [24].

При уменьшении диэлектрической проницаемости жидкости, например, при переходе от пароводяного облака к облаку распыленного керосина, проявление баллоэлектрического эффекта сильно падает. Капли, образованные при разбрызгивании высушенного керосина, содержат лишь несколько единичных зарядов [25].

Образование сажи в пламени метеотрона. Вертикальная нагретая струя продуктов сгорания, возникающая при работе установки метеотрон, визуально бездымная [1, 9]. Однако, металлические поверхности форсуночных устройств, находящихся постоянно в пламени, или зондов, вводимых кратковременно в пламя, покрываются сажевым налетом в течение долей секунды. Присутствие сажи в пламени может означать ее наличие и в объеме струи. Реакционная активность сажевых частиц, их способность к агрегации и большая теплоемкость должны влиять на термодинамические, газодинамические и электрические свойства нагретой струи.

Классификация углеродных продуктов в пламени [26].

Чтобы оценить эти должные влияния проведем анализ известных свойств, характеристик и механизмов образования сажевых частиц в пламени при горении жидких углеводородов в воздухе при атмосферном давлении [27].

Все углеродные продукты построены из сеток графитовых шестигранников. Несколько параллельно расположенных сеток образуют «пакеты», или кристаллиты. Структура углеродных продуктов, образующихся из газовой фазы, менее упорядочена, чем графит. По внешней геометрической форме углеродные продукты делят на три структурных класса [27]:

1. Пироуглерод – слоистый, или блестящий углерод, монолитное углеродное тело, повторяющее геометрическую форму той поверхности, на которой он откладывается в виде слоя, а именно: на нагретых каталитически неактивных поверхностях;

2. Волокнистый, или нитевидный углерод получают на каталитически активных участках поверхности в формах цилиндрических игл (волокон), длина которых превышает их диаметр на несколько порядков;

3. Технический углерод (сажа) – углерод в дисперсном состоянии, состоящий из совокупности субмикроскопических углеродных частиц близкой к сферическим формам. Образование сажи — объемный процесс.

В объеме пламени метеотрона производятся сажевые частицы; на поверхности стальных зондов откладываются углеродные нити; на поверхности стальных форсуночных устройств и форсунок откладываются сначала углеродные нити, покрывая всю поверхность, а затем на этом слое формируется более темный монолитный слой пироуглерода [28].

Строение и структура сажевой частицы. Свойства сажи определяются размером частиц, которые могут меняться в пределах от сотен (100 – 800 Å) [10, 29, 30] до нескольких тысяч ангстрем [26, 30, 31]. Основным параметром сажи, как формы тонкодисперсного углерода, является структурность, т.е. степень соединения об-

щими для соседних сажевых частиц кристаллами в жесткие разветвленные цепочки. В богатых горючим углеводородных пламенах образуются цепочечно-подобные сажевые кластеры с фрактальной структурой, для которых зависимость массы кластера m от его радиуса r изменяется по закону: $m \sim r^D$, где D – фрактальная размерность. На ранних стадиях формирования сажевого аэрозоля (рыхлые кластеры) $D = (1,23 - 1,47)$, для сформировавшихся ветвистых кластеров $D = (1,7 - 1,96)$ [25].

Сажевые частицы, как правило, имеют несколько центров роста [32], построены из изогнутых по сфере и расположенных на равном расстоянии друг от друга графитовых гексагональных сеток мономолекулярной толщины. Структура частицы сажи – «двухфазная». Фазы отличаются реакционными способностями составных элементов организованного (псевдографитные кристаллиты) и неорганизованного (аморфного) углерода. Организованный углерод выгорает быстрее, т.е. вначале [33]. В состав частицы входят не менее 90 % углерода, до 10 % хемосорбированного O_2 , 0,3 – 0,8 % H_2 , 0,05 – 0,5 % минеральных примесей.

Образование сажевой частицы в пламени. В теории образования аэрозолей при конденсации принимается, что в результате спонтанной флуктуации в пересыщенной системе образуется зародыш в форме частицы, состоящей из нескольких молекул [21]. Зародыш сажевой частицы образуется в результате химической реакции, сопровождающейся выделением углерода. Такой частицей может быть только осколок молекулы – активный радикал, способный вступить в реакцию с исходной молекулой углеводорода с образованием нового, более тяжелого и богатого углеродом радикала. В основе процесса лежит химическая реакция, которая не лимитируется размером частицы. Минимальной частицей может быть даже один атом углерода [34] и радикалы C_2 и C_2H . Энергия активации образования радикала-зародыша сажевых частиц из жидких углеводородов имеет порядок 100 – 130 ккал/моль [34].

Образование сажи начинается там, где кислород полностью израсходован для термического разложения углеводородов при

температурах от 1100°C до 2500°C объемного горения. Молекулы углеводорода на своем пути из центральных частей пламени к фронту горения взаимодействуют с продуктами полного сгорания и подвергаются термическому разложению. В результате образуется водород, окись углерода и сажа. Характерной особенностью этого процесса является наличие резкого максимума на кривой скорость образования частиц – время. Этот максимум был объяснен с позиций цепного разветвленного процесса, в котором участвуют активные частицы. Предполагается, что ускорение процесса объясняется разветвлением, а замедление – гибелью активных частиц на поверхности образующихся сажевых частиц. Цепная природа образования сажевых частиц доказана наличием концентрационных порогов и периода индукции и представляет цепной радикальный процесс. Первые акты взаимодействия радикала-зародыша с молекулами исходного углеводорода представляют радикальные реакции, которые идут с малой энергией активации и происходят практически при каждом соударении. В результате этих молекулярных актов образуются опять радикалы. Но этот цепной радикальный процесс отличается от обычного радикального цепного процесса тем, что молекулярный вес образующихся в результате каждого акта радикалов все время увеличивается, активность радикалов непрерывно уменьшается, а значит, уменьшается и скорость их взаимодействия с исходными молекулами. В некоторый момент времени радикалы теряют свои свойства, обретая свойства физической поверхности и превращаясь в минимально возможную сажевую частицу, которая и представляет зародыш, дающий начало новой фазе [26]. В качестве исходного минимального размера частицы зародыша принимают 10 Å, что соответствует 50 атомам углерода [26]. Рост этой частицы обеспечивается за счет гетерогенной реакции разложения углеводородов на ее поверхности.

Промежуточным соединением, приводящим как к возникновению зародышей, так и к росту частиц, является ацетилен, однако, образование зародышей возможно и непосредственно из ароматических соединений (до 1800 К), исключая начальный алгоритм.

Условия образования и влияния. При термическом разложении углеводородов дисперсность получающейся сажи тем выше, чем выше скорость нагревания углеводорода и дальше рассматриваемая система от термодинамического равновесия. При высокой температуре и высокой скорости газов главным фактором дисперсности сажи становится скорость жидких капель относительно воздуха. При скорости движения газов 180 м/с и температуре 1800⁰ С, что соответствует параметрам форсуночных приподнятых пламен, время испарения капель сырья около 0,012 с [35]. При достижении критического значения этого отношения пламя вокруг жидкой частицы срывается, и сажеобразование резко замедляется. Термическая сажа в отличие от всех других саж имеет наименее выраженную вторичную цепочечную структуру и состоит в основном из отдельных, не связанных между собой частиц. Средние размеры таких сажевых частиц по длине факела природного газа и мазута мало отличаются, составляя 250 Å. Как упоминалось выше, зародышами сажевых частиц могут служить углеродные скелеты конденсированных ароматических соединений. Для жидкого сырья чем выше степень ароматизации сырья, тем выше выход и дисперсность сажи, т.е. тем больше сажевых частиц образуется из единицы массы сырья [26]. Введение микродобавок металлов и их соединений, в частности, увеличение концентрации технологических добавок щелочи (КОН) в исходном сырье приводит к уменьшению структурности сажи, сохранению ее высокой дисперсности и относительно высокой подвижности [26].

Скорость образования сажевых частиц и начальная скорость образования радикалов-зародышей при разложении жидких углеводородов находится в сильной обратной зависимости от отношения количества атомов водорода к количеству атомов углерода (H/C) в молекуле исходного углеводорода [26, 30]. Зона образования сажевых частиц характеризуется желтым свечением [9, 32]. Скорость образования частиц быстро растет в центральной части пламени, а затем почти линейно падает [33], чем объясняется пульсирующий характер сажевого аэрозоля при образовании сажи [31].

Поверхностные явления. Активные сажи – графитовые тела с высокоразвитой внешней поверхностью, представляемой «мозаикой» псевдографитов – графитовых кристаллитов, ориентированных под разными углами друг к другу и к плоской поверхности. Взаимная ориентация кристаллитов, считается беспорядочной, но в верхнем слое частицы наблюдается отчетливая склонность к более регулярной ориентации параллельно поверхности. Реакционные свойства саж определяются электронным состоянием периферийных атомов углерода. Адсорбционные и усиливающие активности сажи находятся в прямой зависимости от ориентации кристаллитов в поверхностном слое. Поверхности призматических граней графитовых кристаллитов при атмосферном давлении охотно адсорбируют молекулы кислорода. Весь связанный кислород находится на поверхности частиц сажи, организуя кислородсодержащие на поверхности группы: гидроксильная (фенольная), карбонильная (хинонная), карбоксильная, ряд гетероциклических (в том числе лактоновая) и семихиноны [36]. Адсорбция приводит к снижению поверхностной энергии и изменению дипольного момента двойного электронного слоя. Поверхностные кислородсодержащие группировки, промежуточные продукты окисления углерода, определяют характер и энергию взаимодействия сажи, влияют на ее адсорбционные и каталитические свойства, являются активными центрами адсорбции воды. Окисление ведет к уменьшению высокоактивных центров на поверхности, так как реагирующие участки поверхности переходят в более устойчивое состояние с минимумом энергии, либо это приводит к удалению центров с поверхности [37], поэтому и в основном стабильные кислородсодержащие группировки поверхности саж малоактивны в адсорбции полимеров. Автоокислительные процессы на поверхности сажевых частиц сопровождаются тепловыделением. Сажа – одновременно и хороший теплоизолятор, и аккумулятор тепла [37].

С ростом температуры влияние физической адсорбции падает, а хемосорбции – растет [38]. При атмосферном давлении сажевые частицы адсорбируют на своей поверхности молекулы газов,

главным образом, азота и кислорода. В результате происходит полное покрытие поверхности частиц молекулами газов, образующими адсорбированный слой [39, 40]. Резкое снижение скорости образования сажевых частиц обусловлено гибелью радикалов-зародышей на быстро растущей углеродной поверхности. Молодая сажа обладает самой высокой химической активностью. Далее химическая активность молодой сажи быстро падает при выгорании организованного углерода. Реакционная способность частиц сажи при их росте в процессе старения снижается [41]. Термическая обработка ведет к росту кристаллитов и их переориентации параллельно поверхности, меняет форму частиц сажи от приближенно сферической к полиэдрической; поверхностные химические группировки разрушаются, и активность центров адсорбции поверхности сажи падает [42].

Пересечение приподнятых форсуночных факелов приводит к падению стехиометрического отношения в объеме смешения. Это не только не позволяет саже исходных факелов догореть, но и приводит к дополнительному производству. Фронт турбулентного горения пронизаем не только для окислителя и углеводов, но и для для вихрей, и представляет собой пульсирующую зону конечной толщины – пульсирующий сажевый аэрозоль. Высокоскоростные (30 м/с) вертикальные потоки продуктов сгорания в начальном сечении пламени быстро выводят сажевые частицы из реакционной высокотемпературной зоны. По длине турбулентного диффузионного факела концентрация сажи имеет максимум [26]. Далее стехиометрический коэффициент только растет за счет системного роста притока циркуляционного воздуха к удлиняющимся форсуночным факелам горения паро-топливной смеси поступающей из разогретых форсуночных устройств. Уменьшение концентрации сажи к концу факела объясняется выгоранием сажевых частиц, газификацией, остыванием, центробежным выбросом крупных частиц на периферию струи с конечным выпадением на пассивном участке [9]. Пассивный наклонный участок нагретой струи «сыплется».

Взаимодействие с парами воды. Для интенсификации производства саж в зону высоких температур впрыскивается вода [44]. В нашем случае ввод воды в зону высоких температур метеотрона также сопровождается интенсивным сажеобразованием (см. рис. 6). Нагретая струя продуктов сгорания при работе метеотрона теряет прозрачность. Наличие паров воды в концентрированных суспензиях (дисперсиях) сажи может приводить к адсорбции паров воды на поверхности сажевых частиц. Отдельные участки выхода на поверхность базисных и призматических граней кристаллитов обладают разной «карбофильностью», т.е. неодинаковой смачиваемостью. Это приводит к образованию коагуляционных структур сажевых частиц (и их агрегатов). Если бы вся поверхность не смачивалась средой, наблюдалась бы флокуляция частиц без образования структуры; если бы вся поверхность равномерно и хорошо смачивалась средой, наступала бы пептизация – полное разделение частиц друг от друга [43, 44].

Ввод распыленной воды производится ее подачей в струю продуктов сгорания реактивного двигателя, направленную в пламя [1]. В организованном турбулентном потоке осуществляется: дробление вводимой в газовый поток воды, увлечение капель потоком с сообщением им определенной скорости, испарение, или наоборот конденсация паров из газа на каплях вводимой жидкости, укрупнение капель, перераспределение их по размеру по сечениям струи и выпадение большей части в гравитационном поле из потока. Утверждается, что при дроблении воды, эти капли захватывают (заматают) при своем движении частицы сажи. Количество захваченных частиц сажи определяется суммарной поверхностью захвата. При увеличении числа капель при уменьшении их сечения (исходный объем воды один и тот же) суммарная поверхность захвата все – равно растет. Количество захваченных частиц сажи растет и растет заряд на каплях, уносимый вверх по потоку [27].

О механизмах электризации сажевых частиц. Наличие заряда на аэрозольных частицах существенно меняет динамику их образования и конечные свойства. С одной стороны ионы в камере

сгорания РД и в струе могут стимулировать гомогенную нуклеацию и ускорять коагуляцию мелких частиц электростатическим взаимодействием. Сажевые частицы могут аккумулировать как положительный, так и отрицательный заряд и, эффективно взаимодействуя с диполями молекул воды, способствовать их быстрому накоплению на своей поверхности. С другой стороны, взаимодействие ионов с сажевыми частицами может представлять эффективный механизм гибели ионов [29].

Основными ионами, эмитируемыми реактивными двигателями, являются NO^+ и HSO_4^- [45], но по экспериментальным данным [46] в струе они очень быстро, на расстоянии до 1 м от среза сопла, превращаются в кластерные ионы $\text{HSO}_4^-(\text{H}_2\text{SO}_4)_n$ и $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$. Со временем (с возрастом) отношение всех частиц к заряженным частицам одного знака (Z/N) растет за счет роста среднего размера частиц при коагуляции или за счет отслоения наиболее мелких частиц за счет диффузии; и падает в поле гравитации за счет отслоения более крупных частиц. При повышении влажности наблюдается небольшой рост отношения Z/N [47]. Устойчивой и конечной фазой аэрозоля, как непрерывно протекающего процесса, носящего характер экстраординарного воздействия на фоновый аэрозоль, является «инородная» грубодисперсная фракция сажевых частиц, подверженная в конечном счете, выпадению из статистического ансамбля состояний фонового аэрозоля [48].

Поверхностная ионизация на аморфной саже. Разделение зарядов противоположного знака в ионных кристаллах. При сгорании нефтепродуктов образуются разные радикальные частицы из разных промежуточных продуктов на разных стадиях горения. При адсорбции радикалов на образующейся аморфной саже быстро идут поверхностные процессы миграции неспоренных электронов на частицы с наименьшим потенциалом ионизации [49].

В ионном кристалле ионы разных знаков могут переходить независимо друг от друга из узлов кристаллической решетки на ее поверхность с образованием положительных и отрицательных дырок. Если энергия таких переходов, сводящихся к своеобразной

«адсорбции» ионов на свободной поверхности кристалла, имеет различные значения для ионов разного знака, то вся поверхность кристалла так или иначе приобретает избыточный электрический заряд того знака, который соответствует сильнее адсорбируемым ионам. Поверхностный заряд компенсируется объемным зарядом противоположного знака, плотность которого убывает с увеличением расстояния z от поверхности по закону Дебая – Хюккеля $\rho = \rho_0 e^{-z/\delta}$, где δ – эффективная толщина «диффузного» слоя [22].

О влиянии электрического поля на нагретую струю продуктов сгорания. Пламя метеотрона находится в электромагнитном поле Земли с электрической вертикальной составляющей напряженности около 130 В/м. Общепринятыми механизмами влияния электрических полей (ЭП) на пламена являются: воздействие на кинетику химических реакций и электрогидродинамическое воздействие. Существенную роль играет собственное ЭП пламени, возникающее, вследствие различия подвижностей заряженных частиц [50] в областях амбиполярной диффузии [51]. Электрическое поле возникает в результате разделения электрических зарядов при химических реакциях в зоне горения углеводородных топлив [52]. Химические реакции и приповерхностные явления на частицах в пламенах являются конечными источниками заряженных частиц, концентрации которых в зоне горения значительно превышают термодинамически равновесные значения [51]. Транспорт заряженных частиц – частицы сажи, пыли и пары воды [53, 54].

При извержении фурсунками паро-топливной смеси происходит первое разделение заряда: положительный заряд стекает через конструкцию установки «на землю», а распыляемое скоростным напором топливо уже несет избыточный отрицательный заряд. При разбрызгивании большие, более положительно заряженные капли устремляются вниз к земле, а мелкие, более отрицательно заряженные вверх по потоку продуктов сгорания [22, 24]. Гравитационное разделение – вторая стадия разделения зарядов.

При попадании заряженных капель топлива в зону термического разложения (пиролиза) формируются заряженные сажевые

частицы. При взаимодействии их с воздухом происходит поляризация адсорбированных молекул кислорода, что приводит к более прочному их закреплению на поверхности углеродистых частиц, так как физическая адсорбция сменяется хемосорбцией и ускоряет реакцию взаимодействия частиц углерода с кислородом в период горения, интенсифицируя горение [38]. Хемосорбция кислорода приводит к десорбции молекул азота с поверхности угольных частиц. В электрическом поле уменьшается энергия выхода электрона из углеродистой частицы. Выход его обеспечивает поляризацию кислорода, и физическая адсорбция кислорода переходит в хемосорбцию [54].

Формирование вертикальной электродинамической структуры. Механизмы статической электризации керосина ТС-1 до разбрызгивания форсунками малозаметны. Наличие в топливе воды с одной стороны выделяет баллоэлектрические эффекты, с другой – интенсифицирует образование сажи.

Продукция сажи высокой дисперсности и подвижности и малой структурности в пламени метеотрона обеспечивается активным взаимодействием образующихся частиц сажи с молекулами КОН [54] с результирующим действием – положительной поверхностной ионизацией атомов калия на частицах сажи [2]. Струей переносятся отрицательно заряженные частицы сажи и обожженной пыли, имеющие склонность к образованию и переносу отрицательных зарядов [55, 56]. Струя «электрически отталкивается» от отрицательно заряженной поверхности земли по направлению против вектора напряженности электрического поля.

Если электрическая структура струи формируется электрическим полем земли, то вариации напряженности поля земли должны сказываться на электрических процессах горения и струе продуктов сгорания. Иными словами, вариации напряженности электрического поля земли должны быть кодированы памятью в электрической структуре пассивного участка струи продуктов сгорания.

Как было указано выше, высокоскоростные вертикальные потоки продуктов сгорания в начальном сечении пламени быстро вы-

водят сажевые частицы из реакционной высокотемпературной зоны. Поверхности сажевых частиц на выходе из объема пламени становятся малоактивными в адсорбции полимеров из-за уменьшения высокоактивных центров на поверхности при окислении. Все эти процессы оставляют текущий временной отпечаток в электрической структуре струи при ее формировании. Если механизмы рекомбинации по длине струи разные, то и распределение отрицательного заряда по длине струи должно быть вариативным. В этом смысле струя, по своей распределенной «электрической структуре», напоминает «ленту текущей памяти» записи алгоритма текущих вариаций электрического поля.

Пространственно-временные механизмы разделения электрических зарядов в пламени и струе [57]. Концентрация сажевых частиц наиболее высока в реакционной зоне турбулентного фронта пламени метеотрона. Увеличение электропроводности газов в пламени уменьшает электростатические заряды частиц и содействует образованию углерода [26]. Размеры объединяющихся незаряженных частиц могут превышать длину волны инфракрасного диапазона. Поэтому поглощательная способность их падает, а лучеиспускательная – растет в направлении величины, характерной для материала вещества, т.е. углерода.

Если в реакционной зоне присутствие сажевых частиц очевидно, и определяется даже визуально, то отсутствие их следов в начальном сечении струи на верхней границе области догорания указывает на превалировании механизмов их газификации и испарения с образованием «углеродного пара» [26]. Здесь размеры сажевых частиц не превышают (200 – 250) Å, характерные для гомогенного пламени [58]. Малые сажевые частицы, имеют большую поглощательную способность, поэтому «верхушка факела» пламени дает ослабленный вклад в суммарный поток излучения [57]. При стехиометрической температуре эта полупрозрачная область с белесым оттенком формирует вертикальный тепловой конус.

Рост относительно небольших частиц (1 – 10 мкм) при свободном движении в гравитационном поле возможен за счет благо-

приятных условий коагуляции с более мелкими частицами, если обе частицы несут на себе электрические заряды разных знаков или большая частица заряжена, а малые нет. Электростатическое отталкивание отрицательно заряженных малых сажевых частиц и частиц отожженной пыли будет препятствовать их коагуляции. Высокая ионизация газов в пламени при добавлении щелочных солей увеличивает значимость отталкивания частиц [57, 59].

При коагуляции нейтральных частиц и при увеличении размеров растущих частиц работают иные механизмы [60]. В турбулентном потоке более мелкие (до 1 мкм) нейтральные частицы аэрозоля коагулируют как за счет турбулентной диффузии, так и за счет броуновского движения. За время гидродинамического прохождения вблизи большой частицы броуновское движение малой частицы успевает приблизить ее к поверхности большой частицы. Интенсивность коагуляции значительно усиливается из-за наличия вблизи обтекаемой поверхности больших локальных значений ускорений в турбулентном потоке [60]. По мере подъема при охлаждении незаряженные сажевые частицы коагулируют и выделяются на периферию потока, выпадая в поле тяжести [57].

Единственными долгоживущими носителями заряда могут быть мелкие частицы сажи большой подвижности, чтобы вероятность контактной встречи с молекулой КОН и проведения положительной поверхностной ионизации адатомов калия на их поверхности была бы достаточно высока [2]. Частицы сажи являются материальным транспортом электрического заряда [24, 49] при переносе вверх по потоку. Одновременное действие гравитационных, газодинамических и электрических сил поля Земли на ионы с разными массами и подвижностями приводит к их разделению, увеличению потенциала с высотой, т.е. образованию конвекционного электростатического генератора на сажевых частицах [57].

1.2. Регистрации электрического поля при работе ТУМ

Об условиях приема и методике обработки данных регистраций естественных вариаций напряженности электрического поля. Электромагнитное поле Земли (ЭМПЗ) претерпевает изменения, которые могут быть вызваны природными явлениями и деятельностью человека [61]. Колебания ЭМПЗ могут быть вызваны взаимодействием порывов солнечного ветра с магнитосферой Земли (ниже единиц герц); разрядами атмосферного электричества (5 – 50 Гц); молниевыми разрядами (от десятков герц до десятков килогерц). На характер помеховой обстановки в КНЧ диапазоне электромагнитных полей превалирующее влияние оказывают процессы нижних слоев атмосферы: развитие и движение облаков (особенно грозových), мощные восходящие потоки, ветер, дождь, снег, туман, изменение влажности и т.п.[4, 5, 17]. При широкополосном приеме в каждом диапазоне частот колебания ЭМПЗ содержат непрерывную шумоподобную флуктуационную составляющую (ФС) и импульсную составляющую (ИС). Структура поля КНЧ радиопомех представлена случайным процессом, состоящим из ФС и ИС частей [62]. Различие их тем больше выражено, чем выше диапазон частот. Для электромагнитных полей естественного и искусственного происхождения в КНЧ диапазоне сигналы шумоподобны. Источники и приемник чаще всего сильно разнесены, а сигналы сильно видоизменены передаточной функцией атмосферной трассы и насыщены аддитивными и мультипликативными помехами. Именно поэтому, случайная составляющая сильно преобладает, и сигналы могут исследоваться статистическими методами.

Для регистрации вариаций напряженности электрического поля в КНЧ диапазоне и для последующей статистической обработки цифровых данных выбраны приемники с собственными амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ): У5-6 с полосой пропускания $2\Delta f$ десятки доли – десятки герц, ЭД-05 – с полосой пропускания $2\Delta f$ – сотые доли – десятые доли герц (рис. 7, прил. 3).

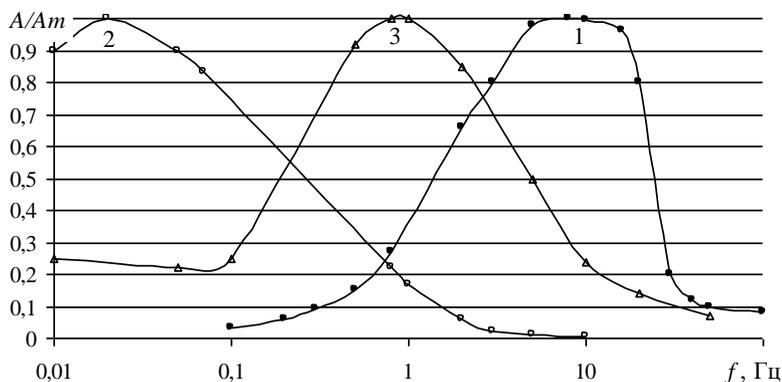


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики приемных каналов: 1 – «штырь у забора 1-2,4», 2 – «трапеция 6-4,5» и 3 – «пирамида 4-4» [1]

При узкополосном приеме наступает нормализация флуктуаций выходного напряжения приемника. Вариации электрической вертикальной E_z -составляющей в диапазоне частот 0,1 – 100 Гц описываются рядом квазистационарных участков длительностью от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от метеоусловий [61 – 63]. Нормализация процессов на протяженных конечных интервалах записи позволяет оценить среднеквадратичные отклонения для центрированных реализаций с помощью метода $E_{\max} = 3\sigma$ (максимальных значений флуктуации), и выбирать амплитудные значения $2E_{\max} = 6\sigma_E$ на визуально подобранных стационарных участках ΔT , с последующей выборочной проверкой на нормальный закон распределения. Нормальный процесс полностью описывается ковариационной функцией (корреляционной – в случае центрированного процесса) его текущих значений или частотной зависимостью его спектральной плотности мощности. Эта методика позволяет оперативно проанализировать общий характер помехи в течение длительных конечных интервалов времени ΔT по накопленным записям реализации. В качестве оценки отношения сигнал/шум выбирается отношение стандартных отклонений сигнала σ_c и стандартного отклонения σ_ϕ флуктуационной E_z -составляющей ЭМПЗ. Яс-

но, что значения отношения максимальных (амплитудных) значений сигналов ФС к шуму близки к трем [64].

При исследовании источников локального электрического поля или факторов влияния на стационарное унитарное поле требуется, прежде всего, определить сезонные и временных интервалы, в которых уровень флуктуаций E_z -составляющей ЭМПЗ в диапазоне частот 0,01 – 1 Гц минимален, а их характер устойчив. Иными словами, при выделении собственных источников генерации электрического поля пламени и нагретой струи при работе ТУМ необходимо обеспечить начальную спокойную помеховую обстановку. Исследование локальных вариаций напряженности электрического поля необходимо проводить от уровня стационарной сезонной помехи унитарного поля [4, 65].

Характеристики ФС. На рис. 8 представлен почасовой ход дисперсии σ_E на полигоне по каналу 1 (см. рис. 7) приемника У5-6 со штыревой антенной высотой 1 м [1] в месте расположения ТУМ и по пяти суточным регистрациям (опытам) для разных сезонов: весна (май), лето (июль), осень (сентябрь, октябрь), зима (декабрь).

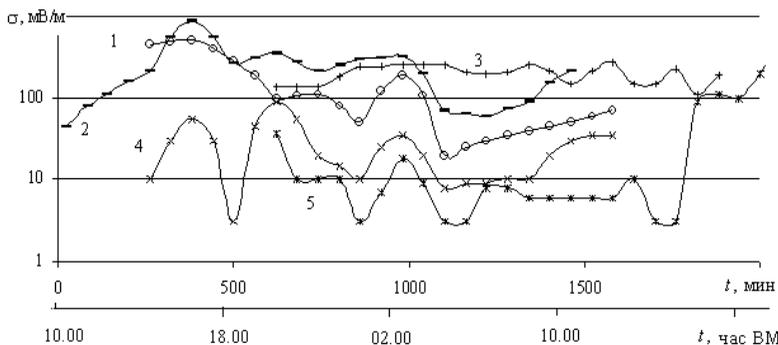


Рис. 8. Суточный ход дисперсии E_z -составляющей напряженности ЭМПЗ: 1 – 1 опыт (22 – 23).05.82 (13.00 – 13.30); 2 – 2 опыт (21 – 22).07.82 (10.00 – 10.30); 3 – 3 опыт (22 – 23).09.82 (20.00 – 17.20); 4 – 4 опыт (23 – 24).10.82 (13.00 – 12.30); 5 – 5 опыт (18 – 19).12.82 (20.00 – 20.30) [64]

При спокойной метеобстановке осенью (опыт № 3, табл. 1) высокое значение σ_E слабо меняется (200 – 400 мВ/м) в течение су-

ток. Суточный ход дисперсии определен процессом, который «включается» на непрерывный режим в ночное время, и на режим модуляции с периодом 4 часа общего уровня помехи в дневное время. При сложных метеоусловиях зимой (опыт № 5, табл. 1) уровень вариаций помехи неустойчив и падает на порядок (до 8 мВ/м). Стационарные участки помехи наблюдаются вечером 21 – 23 часа (до снегопада) и утром 8 – 12 часов (до образования тумана).

Таблица 1. Характеристика метеоусловий для опытов 3 и 5 [64]

№ опыта, сутки, часы	Изменение метеоусловий в течение суток			
	Осадки	v_{cp} , м/с	Направление ветра	Температура воздуха
№ 3 (22-23).09.82 20 ⁰⁰ - 17 ²⁰	нет	1,8 – 6,4	210° - 230° ЮЗ	+8° С - +18° С
№ 5 (18-19).12.82 20 ⁰⁰ - 20 ³⁰	Снегопад: 18.12.82, 23 ч, 19.12.82, 0-2 ч Туман: 19.12, 11.ч.	2 – 4, порывы до 7 9.12.82, 2 ч.	210° ЮЗ (18.12, 20 ч), 180° Ю (22 ч), 200° ЮЗ (23 ч), 120° ЮВ (19.12.82, 0 ч) 210° ЮЗ (3 ч.)	+1,2°: 8.12.82, 22 ч, +5,2°: 19.12.82, 19 ч.

Длительность стационарных участков зависит от времени года и от метеоусловий. В спокойной помеховой обстановке участки стационарности составляют 4 – 5 часов в вечернее и ночное время (опыт 3), достигают 5 часов в дневное время при стабильных метеопараметрах. Среднесуточный уровень вариаций помехи более высок (300 – 400 мВ/м) летом, чем зимой (около 10 мВ/м). Четырехчасовой период модуляции вариаций помехи просматривается на всех кривых $\sigma_E(t)$ (см. рис. 8). Рост величины σ_E может означать появление сильного источника помехи, мультипликативно взаимодействующей с иными типами помех иных источников, например, по типу изменения характеристик общей трассы распространения, или передаточной функции атмосферы при работе ТУМВ [63].

Регистрации электрического поля при работе ТУМ II.

Воздействовать на электрическую составляющую ЭМПЗ принятого диапазона измерений (0,03 – 100) Гц [1] можно влиянием на унитарную составляющую напряженности – воздействием на ионосферу низкочастотными звуковыми волнами, и влиянием на локальную составляющую – воздействием на положительный пространственный заряд нижних слоев атмосферы [65] искусственным локальным электрическим полем с известными характеристиками. Для этой цели необходима протяженная электрически заряженная динамическая структура с собственными ритмами этого диапазона. Такой структуре вполне соответствует естественно-конвективная струя продуктов сгорания от факела метеотрона [1, 2].

Первая серия опытов 1980 года по регистрации вариаций электрического поля при работе ТУМ II [1] на стационарном режиме с мощностью 0,11 млн кВт проводилась при метеоусловиях, когда дальнобойность струи по высоте составила 250 – 300 м, а на высоте 100 м ее диаметр был около 60 м [66]. Вариации регистрировались четырьмя разнесенными приемными каналами (1 – 4) в обозначении авторов, принятом в приложении 8 книги 1 [1, 67]. Там же [1, 67] представлены их относительное расположение и ориентации, характеристики изоляторов, входных блоков и амплитудно-частотные характеристики в интервале 0,01 – 10 Гц. Антенны отстоят от установки на разных расстояниях: первая – 30 м, вторая – 50 м, третья – 90 м и четвертая – 140 м.

На рис. 9 приведена копия участка диаграммы прибора УСЧ8-03, на котором записаны сигналы с выхода регистрирующих каналов. До включения установки ТУМ II каналы 1 – 4 регистрировали помеху (рис. 9, до). При включении

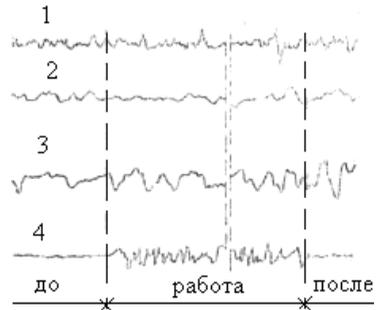


Рис. 9. Компьютерная версия графических записей реализаций процессов вариаций электрического поля до-, во время работы и после работы ТУМ II

установки канал 4 (мачта 1-15) практически сразу регистрировал значительное увеличение уровня вариаций напряженности электрического поля в форме аperiodических колебаний с выделением одного максимума на частоте до 0,1 Гц; каналы 3 (пирамида 4-4) и 1 (вертикальный штырь 1-2,4) указывали на изменение фазовой составляющей без заметного изменения амплитудной; канал 2 (трапеция 6 – 4,5) показывал эффект шунтирования электрического поля вблизи горизонтальной приемной антенны в начале работы и восстановление уровня и качества помехи при работе (рис. 9, работа) [1, 66].

На выключение ТУМВ каналы 1 и 4 реагируют «выключением сигнала», канал 2 – заметно не реагирует, а канал 3 – отмечает медленно спадающий по амплитуде сигнал (рис. 9, после). Оценка дисперсии и ее временной ход по участкам представлен на рис.10.

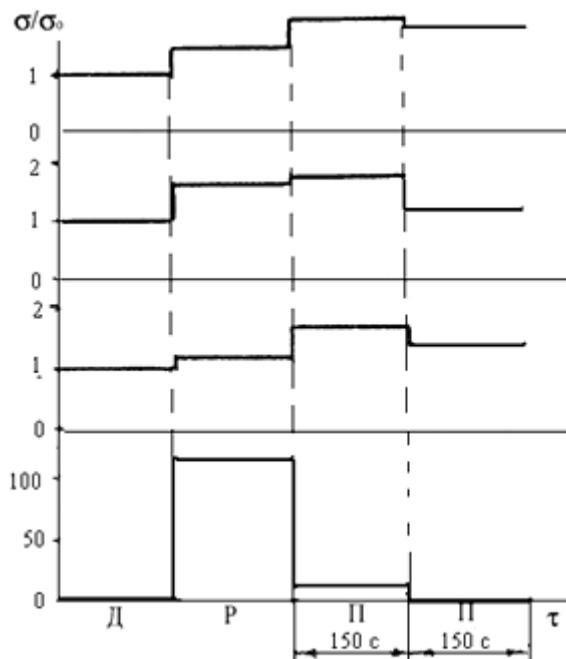


Рис. 10. Изменение дисперсии вариаций по времени

По четвертому, ближнему к установке каналу, дисперсия во время работы возрастает в 115 раз. По остальным каналам происходит некоторое увеличение дисперсии, которое продолжается еще, по крайней мере, в течение 150 с после выключения установки. В последующие 150 с величина дисперсии спадает (рис. 10).

Очевидная инерционность на графических записях реализаций процессов, т.е. сохранение их качества некоторое время после выключения установки (канал 3), указывала на протяженный объект генерации электрических возмущений – нагретую струю продуктов сгорания с избыточным электрическим зарядом и чувствительность к ней канала одного приемного устройства – пирамиды 4-4 [1]. По другим каналам этот вывод в большей или меньшей степени подтверждал рост нормированной дисперсии по участкам длительностью 1,5 минуты, начинающийся при включении установки и продолжающийся в течение нескольких минут после выключения. Инерционный характер изменения дисперсии, по-видимому, связан с тем, что при выключении установки некоторый интервал времени восходящий поток продолжает существовать в форме термика, и некоторый иной интервал времени сохраняются изменения метеоусловий. Этот вывод, как и вывод о переносе нагретой струей избыточного электрического заряда подтверждался при анализе динамики плотности мощности на частоте 0,04 Гц по выделенным участкам (см. рис. 9) четырех измерительных каналов. Возникло обоснование для предположения о наличии и вариативности концентрации электрических зарядов во времени и по длине вертикальной составной нагретой струи ТУМШ [1] с объяснением аддитивного механизма воздействия при текущей суперпозиции собственного электрического поля струи и естественного поля Земли в заданном диапазоне частот. При этом, для струи с повышенной электропроводностью по сравнению с электропроводностью невозмущенного пространства, выделялся и механизм мультипликативного воздействия (см. далее). К последнему типу воздействия было отнесено изменение параметров метеоусловий, так как ранее между ними и естественными вариациями напряженности электрического поля Земли

(помехой) была обнаружена корреляционная связь [4, 66]. Предполагалось, что воздействие мощной нагретой вертикальной струи на атмосферу сопровождается системными нелинейными явлениями, связанными с одновременным тепловым, газодинамическим и электрическим воздействием на локальные метеоусловия (микроклимат) и электромагнитное поле. При очевидной множественности натуральных объектов воздействия и внутренних явных и скрытых естественных обратных связей между ними [63, 68] данное предположение, по мнению авторов, было и есть вполне резонным и даже усиленным в части всестороннего и активного воздействия [17, 69 – 71].

Процессы разделения электрических зарядов по знаку протекают во время хранения, истечения и диспергирования топлива, его перемешивания с окислителем и продуктами сгорания, горения (см. выше). Процесс формирования вертикальной нагретой струи в поле тяготения разводит электрические заряды разных знаков, усиливая эффект. Возникающая при работе ТУМ II нагретая струя продуктов сгорания должна быть носителем и транспортом электрического заряда определенного знака.

Статистический и спектральный анализ цифровых реализаций процессов вариаций вертикальной E_z -составляющей напряженности электрического поля до-, во время- и после работы ТУМ II (см. рис. 9) показал, что факел пламени и нагретая струя достоверно с надежностью 90 % создают локальное электрическое поле с максимальной плотностью мощности в КНЧ диапазоне. Стохастический механизм генерации, определенный по шумоподобному спектру плотности мощности (СПМ) и трактуемый как квазиэлектростатическое генерирование локального поля пламенем и нагретой струей посредством устойчивого возмущения пограничного слоя атмосферы с максимальным энерговыделением на около- нулевых частотах. Детерминистские механизмы генерации электрических колебаний слабые. Их проявление находится под указанным шумом. Выделить удается на стационарном режиме работы: дипольное излучение, как осцилляции тепловой струи (0,1 – 0,3 Гц).

СПМ реализации по 4 каналу (рис. 11) обусловлен практически только воздействием струи, так как в этом случае отношение амплитуд сигнала к шуму составляет величину порядка 10. Спектр рассчитан с учетом передаточной характеристики приемного канала в интервале частот $0,01 \div 0,5$ Гц по нормированным к максимуму данных регистрации вариаций напряженности электрического поля для сформированной нагретой струи после 10 минут работы ТУМ.

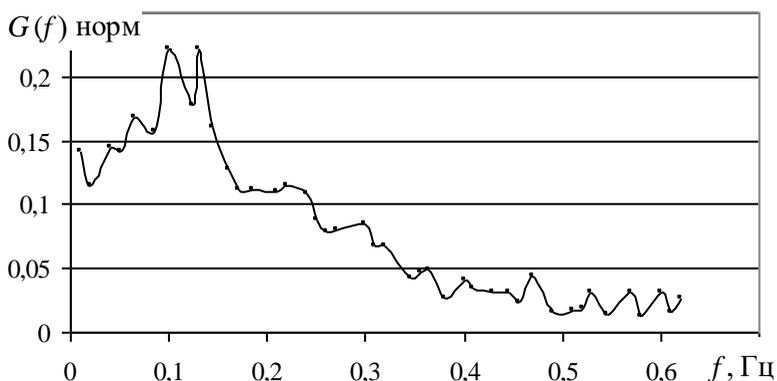


Рис. 11. СПМ напряженности электрического поля зарегистрированного каналом 4 при работе ТУМ II. Струя нагретая сухая сформировавшаяся

Можно предположить, что существование в спектре на частоте 0,1 Гц максимума связано с газодинамическими пульсациями. Для частоты 0,04 Гц этот ход представлен на рис. 12. По оси ординат отложена плотность энергии в относительных единицах, по оси абсцисс – время, отсчитываемое от момента начала работы установки. Установка в этих опытах работала в течение 150 с. Видно (рис. 11 и 12), что тепловая струя оказывает воздействие на вариации электрического поля, измеряемое в районе установки. Процесс воздействия имеет инерционный характер, причем время запаздывания исчисляется минутами.

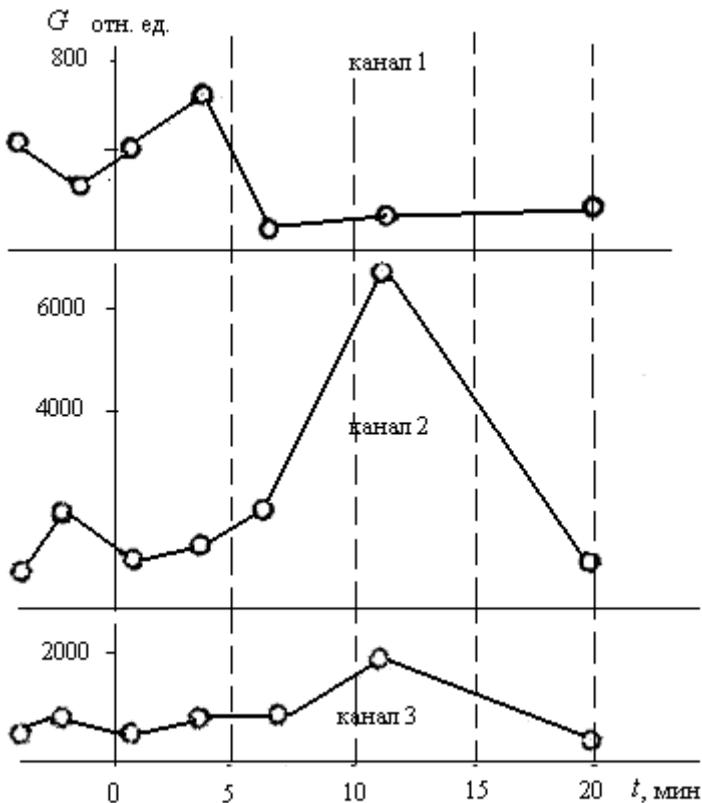


Рис. 12. Дискретная динамика СПМ на частоте 0,04 Гц по каналам 1 – 3

При увеличении разрешения спектров по частотной оси с ростом погрешности результатов до 60 % получены достаточно спорные результаты, которые, однако, могут нести и дополнительную информацию, ранее «замытую» сплайн-интерполяцией, поэтому анализ СПМ с пониженной надежностью результатов будет применяться и далее с понятными оговорками. Например, широкий пик на около-нулевых частотах раздваивается на низкочастотный и постоянный узкий с максимальным пиком плотности мощности на 0,08 Гц, определяя дипольное излучение при осцилляции электрически заряженной струи. Меньший и непостоянный по величине и

местоположению на частотной оси, но тоже узкий пик в спектре приходится на частоты 12 – 14 Гц. Сильная зависимость его местоположения на частотной оси от режима работы установки по уровню мощности, по мнению авторов, определен макро-пульсациями ограниченного объема отличной диэлектрической проницаемости, как эффект автоколебательных процессов в системе установки. Относительно небольшой широкий пик покрывает интервал частот 0,5 – 1,5 Гц и отвечает за работу горелок периферийных составляющих факелов ТУМ II, фиксируя рост, «срывы» и перемещения термиков с периферийных областей очага [72].

К определению знака электрического заряда пламени ТУМ. Короткая ссылка на методiku и результат экспериментов по определению знака электрического заряда пламени ТУМ по необходимости в контексте была дана в книге 2 [2]. При этом допущена некорректность редакции:

ссылка на рисунок схемы модельного эксперимента дана, а рисунок не приведен (см. стр.114 в [2]). Требуется исправить допущенную некорректность (рис. 13) и рассмотреть результаты экспериментов более детально.

Обратим внимание, что все дальнейшие результаты исследований будут касаться работы модификации ТУМV. Это связано с тем, что эволюция ТУМ I – V при росте расхода топлива определялась уменьшением задымления и ростом экологического качества нагретой струи [1]. В горелочных устройствах ТУМV было достигнуто такое качество сгорания топлива, что активный участок

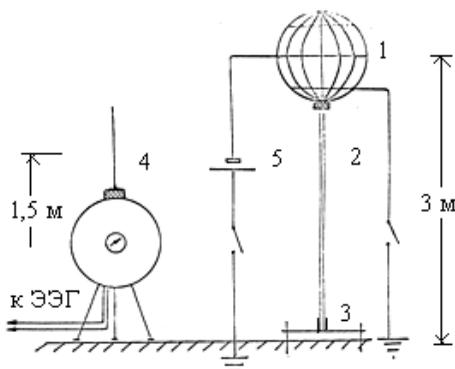


Рис. 13. Схема модельного эксперимента по определению избыточного некомпенсированного заряда пламени и тепловой струи метеотрона: 1 – калибровочный шар [1], 2 – деревянный сухой держатель, 3 – подставка металлическая, 4 – приемник E-поля [1, 73], 5 – аккумулятор (10 банок)

нагретой струи «сливался» с радиационной колонкой и был заметен визуально. При работе ТУМВ лишь значительный ветровой сдвиг переводил активный участок в пассивный, выводя его вбок из колонки с малым задымлением, указывая на наличие значимой концентрации мелких сажевых частиц на активном участке. Авторы резонно исходили из того факта, что «эталонное» горение дает чистую – «сухую» струю, в которой поток массы представлен малым числом чрезвычайно малых сильно нагретых частиц, но эффективными в качестве транспорта электрического отрицательного заряда [4, 22, 47, 55, 58 – 60].

Ранее (в разделе I.1) было показаны разные механизмы разделения зарядов разных знаков при истечении топлива через форсунки тепловой установки и, в частности, рассмотрен случай дробления (разбрызгивания) струи в окружающем пространстве, возникающего при наличии двойного электрического слоя на границе металл-жидкость. При трении жидкости о металл происходит электрометрическое разделение зарядов в узком слое (границе). Металлы при трении о диэлектрик в зависимости от состояния поверхности, свойств диэлектрика и интенсивности взаимодействия могут электризоваться как положительно, так и отрицательно [74]. Необходимо было достоверно определить знак электрического заряда пламени и струи, а также знак электрического заряда, получаемого установкой. Методика эксперимента основалась на вполне резонном предположении: если разделение по знаку электрического заряда происходит в пламени, то заряд одного знака уходит на многочисленных малых частицах транспорта в струю. Электрический заряд другого знака уходит на «землю» на выпадающих на поверхность конструкции и земли частицах.

Проверить это предположение оказалось достаточно просто экспериментально, смоделировав знак потенциала факела пламени потенциалом изолированного от поверхности земли калибровочного шара [1]. Воздушный шаровой излучатель диаметром 1,5 м был изготовлен (сварен) из стальных трубок и закреплен через фарфоровый изолятор на деревянном сухом пропитанном креозотом дер-

жателе [1]. Один из полюсов источника ЭДС задавал потенциал изолированному относительно земли шару (см. рис. 13).

Методика эксперимента состояла в качественном сопоставлении направления отклонений пера самописца (ЭЭГУ-16-02) канала регистрации E_z -составляющей электромагнитного поля от нулевой линии в моменты диспергирования топлива форсунками ТУМ и зажигания факела пламени и при калибровке приемника этого же канала регистрации E_z -составляющей в поле калибровочного шара [17, 74, 75]. Направление отклонения пера самописца было одинаково, когда к шару присоединялся отрицательный полюс аккумулятора (прил. 1). Это и дало основание утверждать, что в нагретую струю из пламени непрерывно поступает некомпенсированный отрицательный заряд, а такой же по величине положительный электрический заряд с той же скоростью «стекает на землю» через конструкцию ТУМВ [1, 74], и суммарный электрический ток по вертикали равен нулю. Это, очевидно, не противоречит естественному разделению электрического заряда по знаку в приземном слое атмосферы в электромагнитном поле Земли [65, 76].

Электрические факторы зарядки транспорта струи ТУМ. Напомним, что по результатам зондовой диагностики превалирующим процессом электрической зарядки в зондовом промежутке пламени ТУМВ был назначен процесс положительной поверхностной ионизации атомов калия на частицах сажи [1, 2, 77 – 79]. Не отрицая иные возможные процессы электризации нагретой струи [2], оценим предельные возможности указанного механизма ионизации. Как известно [2, 20], в качестве активного вещества используется КОН (технологическая присадка к топливу ТС-1) количеством 0,4 мг на 100 мл топлива. На номинальном режиме давления подачи топлива на форсунки 100 атм расход топлива составляет 9,5 л/с и 38 мг/с щелочной присадки КОН или в перерасчете на калий – 32 мг/с, или $5 \cdot 10^{20} \text{ с}^{-1}$ ионов калия при полной диссоциации молекул КОН в факеле пламени ТУМВ. Однако при равновесной ионизации в объеме 800 м^3 факела при однородно распределенной температуре 1500К парциальное давление атомов калия $p_K = 15 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$, что соот-

ветствует доле ионизированных атомов калия $8 \cdot 10^{-4}$ [2]. В таком случае расход ионов калия составит $4 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$, а максимальный вертикальный конвекционный ток струи – до 65 мА. Этот результат очень чувствителен к изменению параметров факела, и особенно температуры пламени. Условно говоря, каждые сто градусов повышения или понижения меняют степень доли ионизированных молекул на единицу в «плюс» или в «минус», соответственно [2]. Так регистрация магнитной антенной [68, 69] магнитного поля нагретой струи при работе метеотрона в пересчете ее на полуограниченный линейный электрический ток дала результат 8 – 10 мА. Например, использование значения температуры пламени 1400 К вполне возможно, так как позволяет проходить процессу сажеобразования, но уменьшает вертикальный ток до 6,5 мА. Но такой результат вполне совместим с экспериментальными данными.

Наряду с погрешностью и предельным характером вышеприведенной оценки можно признать и возможные физические причины несовпадения экспериментального и аналитического результата, например, недостаток носителей элементарного отрицательного заряда. Иными словами, «за что боролись, на то и напоролись» - экологически чистая нагретая струя имеет недостаточно малых сажевых частиц для обеспечения предельно возможного конвекционного тока [29]. Поэтому и характер, и преимущественные реакционные отклонения пера самописца на изменение структуры излучателя можно достоверно предсказывать при смене режима работы ТУМ. Но другой транспорт для электрических зарядов отсутствует, в частности, влажность в радиационном вертикальном конусе практически нулевая, что позволяет использовать его для «выжигания» дыр и следов (трасс) в низкой облачности [2], но и ожидать мощных электрических полей в предоставленных условиях, очевидно, не приходится.

Газодинамические и электрогазодинамические факторы нагретой вертикальной струи ТУМ. Составной факел сплошного объема пламени метеотрона [1, 2, 80] любой модификации визуально напоминает факел пламени при горении большого деревянного

сруба, в несколько меньшей степени – горение газовой скважины, и сильно отличен от большого распределенного лесного пожара. Все упомянутые объекты имеют радиационные тепловые колонки и вертикальные нагретые струи с мощностью, пропорциональной R^2 , где R – начальный радиус струи [5].

В течение нескольких минут работы из-за прогрева горелок с форсунками происходит монотонный рост объема пламени увеличением поперечных размеров. Топливо из форсунок поступает в конечном итоге не в жидком диспергированном виде, а в парогазовой фазе, организуя приподнятые факела. Процесс догорания парогазовой смеси сдвигается от головки факела к началу: струя удлиняется ростом начального импульса выброса нагретой смеси, а головка факела теряет в объеме. Так, головки приподнятых форсуночных факелов уменьшенных диаметров оказываются на поверхности сферы большего радиуса и теряют контакт между собой, и сплошной контур пламени разрывается.

Основной вклад в неустойчивость вносят как коротковолновые возмущения, привносимые в структуру контура форсуночными факелами, так и «опоясывающие» возмущения большой длины волны, превалирующие по мере роста сплошной кромки контура пламени. На сплошном фронте пламени при касаниях и наложениях головок факелов должны возникать собственные поперечные колебания. Перемещение фронта в сторону увеличения объема пламени – неустойчиво: длинноволновые возмущения дестабилизируют зону горения, а коротковолновые – зону испарения [81].

Автоколебания в топливной сети приводят к пульсациям каждого приподнятого факела с распределением по длине плети. Фронт пламени формируется из предложенного спектра сопряженных поперечных и радиальных пульсаций. Частотные составляющие составного факела пламени метеотрона в спектрах могут быть заданы расстоянием между соседними форсунками, скоростью топливной (а затем – паро-топливной) смеси на выходе из форсунок и периметром контура пламени переменной кривизны [1, 82].

Положительная дивергенция вектора импульса продуктов сгорания формируемого активного участка струи компенсируется отрицательной дивергенцией вектора импульса воздушных масс с горизонта. Усиливающаяся циркуляция вектора импульса натекающих с горизонта воздушных масс определяет растущую по величине тангенциальную составляющую вектора скорости к боковой кромке контура пламени. Это создает благоприятные условия для организации на периферии пламени вихревых структур, вырождающихся по мере их сноса по контуру в замкнутую на поверхность земли смерчеподобную структуру (рис. 14) [82].



Рис. 14. Компьютерная версия работы метеотрона IV (7.02.80) [1]. Метеоусловия: тихо, пасмурно, перед снегопадом. На расстоянии 20 м от кромки пламени и в его проекции находится наблюдатель (масштабная единица) качества перемешивания и горения в объеме пламени

Благодаря конструкционным особенностям форсуночного узла установки метеотрон объем пламени организуется многочисленными пересечениями форсуночных факельных приподнятых пламен с достижением интенсивного перемешивания продуктов горения топливно-воздушной смеси в объеме пламени и сплошности горения. Интенсивная внутренняя газодинамика в объеме пламени и начальном участке струи в гравитационном поле Земли приводит к

непрерывному процессу разделения нагретых массовых частиц: крупные частицы стремятся на периферию пламени и струи, а более мелкие стремятся перейти в объем струи, обеспечивая транспортом приосевые течения. Интенсивные электрофизические процессы на поверхности частиц в пламени приводят к разделению частиц по знаку электрического заряда. Более крупные частицы обретают преимущественно положительный заряд, а мелкие – отрицательный, формируя дрейфовый ток частиц в электрическом поле Земли. В спокойную безветренную погоду накопление на вертикальном уровне отрицательной плавучести (например, на слое изотермии) отрицательного заряда в конечном итоге приводит к ослаблению собственного электрического поля струи, ослаблению процесса разделения объемного заряда по знаку и ослаблению электрической структуры струи. Формирование вертикальной нагретой струи продуктов сгорания сопровождается сложными нарастающими внутренними электрогазодинамическими (ЭГД) вертикальными течениями, далее – угнетаемыми нарастающим по высоте собственным электрическим полем струи.

Мультипликативный эффект воздействия при работе ТУМV. При аддитивном воздействии амплитудно-фазовые вариации напряженности электрического поля складываются от возникающих при работе ТУМ различных независимых источников, или объектов влияния: составного факела пламени, активного и пассивного участков нагретой струи и тепловой колонки. Мультипликативный эффект воздействия должен был быть определен групповой системной реакцией объектов влияния с разными амплитудно-фазовыми характеристиками, интервалами времен запаздывания и физическими механизмами взаимосвязей. Для проверки наличия такого эффекта воздействия нагретой струи ТУМV на локальное электрическое поле в КНЧ диапазоне были разработаны и поставлены комплексные прямые эксперименты [63] с привлечением частично и полностью установок ассистентов кафедры физики ВПИ Т.В. Шепиловой [83] и В.В. Дорожкина [84].

Подтверждением мультипликативного эффекта воздействия принималось фиксируемое по влиянию на трассу распространения электромагнитного сигнала изменение свойств приземного слоя атмосферы, поэтому для проведения опыта был необходим мощный электромагнитный сигнал с устойчивыми характеристиками в КНЧ диапазоне. Эффективность известных систем генераций электромагнитных полей (ЭМП) в КНЧ диапазоне, является низкой вследствие ограничения их размеров условиями эксплуатации. Электрические переменные сигналы высокой мощности могут быть получены с помощью электромашинных генераторов либо с помощью генераторов на полупроводниковых управляемых приборах. Электромашинные генераторы не удовлетворяют требованиям получения сложных сигналов и их последовательностей; обладают невысокой стабильностью фазы переменного напряжения и нуждаются в согласующем элементе, например, трансформаторе, между генератором и нагрузкой [84]. Электроразведочная генераторная станция ЭРС-67 и генераторная установка ИНФАЗ-ВП [84 – 86] не удовлетворяют указанным требованиям из-за малых величин рабочих токов и возможности генерирования только переменных напряжений без модуляции.

Для генерирования электромагнитных полей в большом объеме проводящей среды В.В. Дорожковым было разработано передающее в СНЧ диапазоне излучающее устройство, включающее: аппаратуру контроля, генератор на силовых полупроводниковых тиристорах с тиристорным коммутатором и блоком управления, силовой блок питания, преобразующий полнофазное напряжение 380 В частотой 50 Гц в постоянное дискретно регулируемое напряжение. Постоянное напряжение силового блока питания преобразовывалось в сигналы заданной частоты и формы. Преобразователь напряжения был построен по схеме частотно-управляемого параллельного инвертора тока. Электронный блок управления использовал опорные сигналы от задающих звуковых генераторов ГЗ-110 [84].

Известно, что полупроводниковые тиристоры способны коммутировать мощности в несколько мегаватт [87], и способы управления ими позволяют формировать сложные сигналы с высокой надежностью в диапазоне генерируемых частот от 10^{-3} Гц до 10^4 Гц [84]. Средняя мощность в нагрузке для генераторной установки составляла 5 кВт, импульсная – до 50 кВт. В режимах непосредственного преобразования с широтно-импульсной модуляцией и с времязимпульсной модуляцией генерировались переменные напряжения, импульсы, импульсные последовательности необходимой формы и длительности [84]. Задание частоты и фазы генерируемого сигнала могло производиться от синтезатора частот аппаратуры обработки и регистрации, обеспечивая, таким образом, привязку к фазе опорного сигнала [84].

В качестве излучающего устройства, допускающего питание значительными токами, мог использоваться: электрический диполь с заземленными или заводненными концами или магнитный диполь в виде замкнутого витка. В рассматриваемой серии экспериментов в качестве излучателей генераторной установки применялся излучатель в виде электрического диполя, выполненный из изолированного алюминиевого кабеля длиной 1250 м, уложенного в землю на глубину 0,5 м, концевые заземления которого размещены по дну непромерзающих озер [84, 88] и имеющего входное сопротивление около 8 Ом. Создаваемое электромагнитное поле необходимо для исследования его нелинейного преобразования вносимыми в поле объектами.

На помещенные в озера 1, 2 электроды (•), находящиеся на расстоянии 1250 м друг от друга, подавался сигнал с генератора ГЗ-16 на частоте 9 Гц с десяти процентной амплитудной модуляцией с частотой 1 Гц (рис. 15). При этом через электроды проходил ток 40 – 44 мА. С помощью дипольного излучателя 5 больших размеров в атмосфере создавалось ЭМП с частотой 9 Гц. Работа ТУМВ 3 меняла локальные свойства атмосферы.

Эксперименты по регистрации, измерениям и анализу вариаций вертикальной E_z -составляющей напряженности электрического

поля проводились в диапазоне частот 0,03 – 20 Гц на стационарном режиме работы метеотрона модификаций II – V с постоянным давлением подачи топлива на форсунках. Эталонным электрическим зондом служил вертикальный несимметричный диполь с $h_{эфф} = 1$ м с электрометрическим усилителем У5-6 [1].

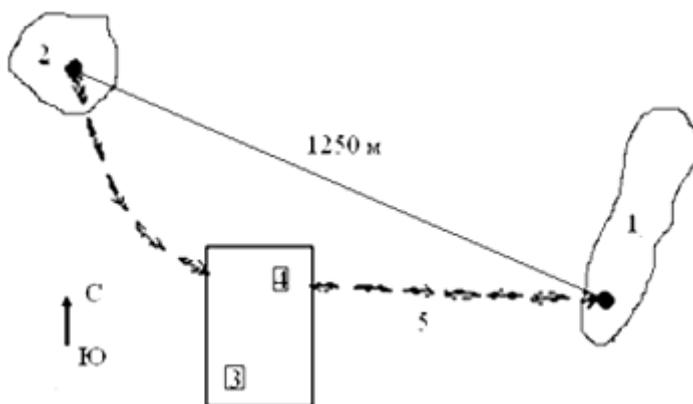


Рис. 15. Схема экспериментов по обнаружению мультипликативного эффекта воздействия при работе ТУМ: 1, 2 – электроды №1 и №2; 3 – ТУМВ

В опытах работа ТУМВ на постоянном режиме чередовалась с участками модуляции (100 %) давления топлива на входе в форсунки с частотой $f = (0,1 - 0,7)$ Гц и длительностью 10 – 20 с. Периодическое мощное тепловое воздействие атмосферы в районе антенного поля сопровождалось периодическим изменением свойств восходящей струи.

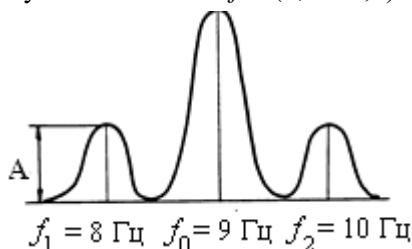


Рис. 16. Вид спектра принимаемого сигнала

Изменяющимися параметрами являлись температура, давление, концентрация свободных зарядов, электропроводность и влажность.

На стационарном режиме работы установки спектр принимаемого сигнала имел максимумы (рис. 16) на основной частоте (9 Гц) и бо-

ковых частотах (8 Гц и 10 Гц). При работе установки в режиме модуляции мощности снижение амплитуды сигнала превысило аддитивную добавку и, и объяснялось мультипликативным эффектом, обусловленным изменением граничных условий вблизи измерителя и приемника [63].

Система устройств генерации и излучения ЭМП в низкочастотных диапазонах может быть использована для выявления и классификаций неоднородностей проводящей среды в искусственно создаваемых низкочастотных электромагнитных полях, а также в качестве калибратора распределенных антенных полей и имитатора простых сигналов в импульсном и непрерывном режиме излучения [75, 88, 89]. В этом смысле она оказывается незаменимой при расшифровке элементарных сигналов, например, от перемещающихся электроотрицательно заряженных вихревых колец, при работе установки ТУМ III [90 – 93]. Обнаружение объекта происходит по выявлению нелинейного преобразования первичного поля КНЧ диапазона, созданного в большом объеме проводящей среды.

Другим активным методом обнаружения неоднородностей проводящей среды служил разработанный работниками кафедры на экспериментальной базе метод вращающегося электрического поля [83]. Этот эффективный метод основан на выявлении искажения динамической структуры электрического поля, вектор напряженности которого вращается с малой угловой скоростью (0,24 – 2,0 Гц) в проводящей среде в зоне расположения неоднородностей и возможность приема излучаемого вращающегося электрического поля. Это позволяет, в частности, проводить регистрации вращательной динамики заряженных электроотрицательных сажевых контуров (выхлопов) на пассивном участке нагретой струи метеотрона [89], а также исследовать возможные влияния вращающегося электрического поля на динамику и структуру заряженных сажевых вихревых колец [1].

1.3. Регистрации акустического поля при работе ТУМ

Источники акустических колебаний диапазона частот ниже 20 Гц. Акустические источники и основные характеристики акустических колебаний и волн диапазона частот 0,1 – 100 Гц достаточно подробно описаны в книге 1 [1]. Содержательная информация в необходимом объеме для претворения перехода к описанию разработок авторами приемника инфразвукового давления. Следует напомнить, что акцент в исследовательской работе был сделан на частотный диапазон ниже 20 Гц, который включает в себя группу акустических колебаний, называемых инфразвуками [94]. Иногда включают в этот термин и геоакустические процессы диапазона ниже 0,01 Гц [94, 95]. Поэтому в качестве естественных источников инфразвука (табл. 2) рассматривают все виды турбулентного движения, с периодическими и случайными колебаниями плотности воздуха, которые могут быть измерены как инфразвук [94 – 96]. В атмосфере источниками инфразвука являются перемещения верхних слоев атмосферы (1 – 16 Гц [96]), восходящие потоки воздуха и орографические явления, входящие в атмосферу метеориты [97], разряды молний [98] и полярные сияния [99]. На поверхности Земли к естественным источникам инфразвука относят поверхности больших бассейнов, сейсмические явления, лесные пожары и извержения вулканов [95, 100, 101].

Таблица 2. Источники инфразвука и их основные характеристики

Источники		Способ генерации		Механизм генерации (спектр частот)	
естественные	искусственные	механические – движения механизмов	протоочные – течения жидкостей	турбулентные потоки (сплошной спектр)	осцилляции жидкости (узкий диапазон)
					преобразование импульсных волн

Источники аэродинамического шума. Искусственные и естественные мощные открытые пламенные факелы и нагретые струи являются источниками аэродинамического шума [95, 88, 89], и при этом шумы горения и струи имеют характерные отличия. Спектры шума горения в ближнем и в дальнем поле одинаковы по признаку отсутствия дискретных частот независимо от расстояния и направления распространения. Шум же струи, как известно [102], имеет типичную длину волны не менее 7 диаметров.

Источником аэродинамического шума с проточным механизмом генерации акустических колебаний (см. табл. 2) являются холодные турбулентные струи. Теория Лайтхилла [103] для дозвуковых холодных турбулентных струй и построенная на ней теория генерации звука турбулентными пламенами [104] основывается на монопольном механизме излучения звука. Процессы горения увеличивают интенсивность генераций на 20 – 40 дБ, не меняют механизм генерации [103, 104], но вносят характерные особенности [102 – 107]: 1. Шум горения малых турбулентных пламен в большей степени зависит от характера изменения скорости тепловыделения, чем от ее величины, т.к. зона генерации шума обусловлена статистическим распределением монопольных источников мольного горения; 2. Существенное влияние генерируемых волн давления на скорость мольного горения; 3. Зависимость коэффициента преобразования тепловой мощности в акустическую от рода топлива и режима горения в пределах $\eta = 10^{-9} \div 10^{-7}$; 4. Камерное «горение в молях» [103, 104] покрывает высокий частотный диапазон, а переменность сплошного объема пламени при открытом горении должна генерировать низкие частоты с большим коэффициентом преобразования.

Такие исследования проблематичны. Естественные источники больших акустических мощностей представляют случайные события (лесные пожары, извержения вулканов), а искусственные источники генерируют малую акустическую мощность, как при открытом поверхностном горении жидкого топлива (горение в «лужах» [101, 108, 109]).

Акустическое поле факела и струи метеотрона. При работе ТУМ II – V на стационарном режиме эффект излучения инфразвука в ближней акустической зоне (ближе 100 м) ощущается весьма достоверно по сильнейшему шунтирующему эффекту: уши «закладывает» и иные звуки кроме низкого гула, находящийся вблизи человек перестает слышать. Не заметить такое действие просто невозможно. Попытки зевать и приоткрыть евстахиеву трубку (как это с успехом делается при взлете самолета) не приводит к выравниванию давления. Находящийся рядом человек может без успеха «криком кричать тебе в ухо». Здесь же рядом находящаяся собака сторожа забивалась в будку «поджав хвост». В относительно дальней зоне (д. Дворики), далее 2 км от установки то же самое, и из опыта в опыт (при включении метеотрона) проделывали все домашние животные. Максимальный физиологический дискомфорт наблюдался при работе ТУМ V на номинальном режиме с минимальным задымлением активного участка нагретой струи и с перепадом давления на форсунках горелочных устройств 100 атм [1]. Именно эти наблюдения и вышеприведенные обоснования привели авторов к предположению, что наряду со звуковыми частотами, работа ТУМ V генерирует значительную мощность в инфразвуковом диапазоне. Это было только предположение. Не было известно ни самого факта генерации инфразвука, ни распределения акустической мощности в инфразвуковом диапазоне частот. Не были известны и потенциальные генераторы длинных акустических волн. Вызывал сомнения даже очевидный факт возможного наполнения диапазона малых частот собственными колебаниями непрерывной вертикальной нагретой струи из-за малой ее массы. Иными словами, основной принцип построения ТУМ, генерации экологически чистой струи, означал неукоснительное приближение к бездымной, немассовой струе. Вопросы взаимосвязи собственных электрических и акустических полей в КНЧ и инфразвуковом диапазоне, соответственно, тогда вообще только проговаривались условно и чаще – с иронической ухмылкой.

I.4. Результаты комплексных экспериментов

I.4.1. Регистрации электрического поля вдали от ТУМВ

Обоснование опытов, методика проведения, результаты и обсуждение. Серия опытов 4.06.80 г. была проведена с регистрацией электрических полей в системе единого времени двумя пунктами – стационарным, как и в опытах 11.05.80 г. и передвижным – перемещенным на расстояние 16 км к востоку от экспериментальной базы. Серия состояла из шести опытов, в каждом из которых время работы ТУМВ составляло 11 минут с перерывами между включениями 1,5 – 2 часа. Результаты, полученные при регистрациях каналами, расположенными на экспериментальной базе, практически не отличались от результатов опытов 11.05.80 г. [110] в части того, что приземный слой после 12 – 15 минут работы ТУМВ теряет локальную газодинамическую устойчивость, обеспечивая столь сильную ветровую помеху, что производить какие-либо измерения кроме нее самой не представляется возможным [111, 112]. Это означало, что приемные каналы вблизи ТУМ могут быть использованы для исследования естественных электрических процессов лишь первые 10 – 15 минут его работы [113].

Для проверки достоверности процесса генерации собственного электрического поля факелом пламени, струей и тепловой колонной были проведены эксперименты по регистрации E - составляющей электромагнитного поля Земли до-, во время - и после работы метеотрона на стационарном режиме и на расстоянии 16 км от установки метеотрон с вынесением антенного измерительного поля из-под непосредственного влияния факела и нагретой струи.

В точке регистрации работали 3 независимые канала, идентичные каналам 1, 2 и 6 [1] в переносном исполнении. По реализациям передвижного пункта без предварительной обработки ни выделить моменты начала работы ТУМ, ни определить ее периоды работы не удалось. Поэтому была применена методика синхронного производства сигналов с выделением интервала работы и момента запуска (зажигания топливовоздушного облака) ТУМ. При поиске

среднегеометрического графические и цифровые реализации каналов по трем первым опытам были совмещены по моменту согласования начала работы установки. После этого вычислялись синхронные произведения величин напряженности поля по всем каналам

$$[11]: \Pi = \frac{\prod_1^3 l_1 \cdot \prod_1^3 l_2 \cdot \prod_1^3 l_3}{9}, \text{ где } \prod_1^3 - \text{ знак процедуры произведения}$$

по трем первым опытам; l_1, l_2, l_3 – отклонение перьев канала, соответствующее изменению напряженности поля.

На рис. 17 приведены графические результаты такого перемножения по трем каналам и по трем первым опытам (№№ 1 – 3).

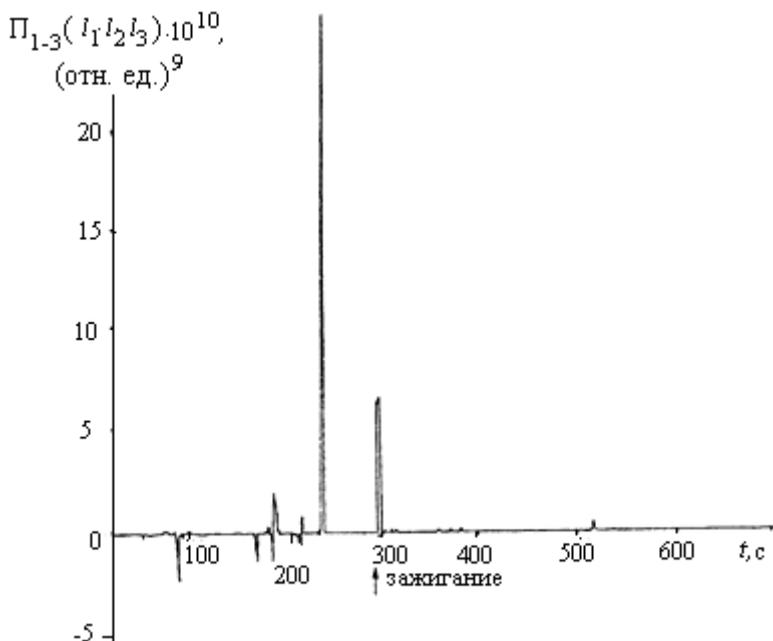


Рис. 17. Графический результат синхронного произведения вариаций напряженности, зарегистрированных измерительными каналами передвижного экспедиционного пункта по трем каналам: l_1, l_2, l_3 и трем опытам (№№ 1 – 3)

Обозначенные первые три опыта были подобны: без алгоритма управления. При первом включении (перед опытом 1) было включение силового рубильника, так как ТУМV «запитывалась» автономно от энергообеспечения базы и установок на ней – по отдельной трансформаторной линии. Установка работала по 11 минут на стационарном режиме расхода топлива. Алгоритм действий оператора в трех случаях был одним и тем же: включение электродвигателя подкачивающего насоса низкого давления, проход около 30 м до насосов высокого давления и поочередное включение электродвигателей, монотонный выход на постоянное давление подачи топлива по обоим насосам по расходу топлива до 3,5 л/с и 6,02 л/с, соответственно. При последнем действии на горелочных устройствах ТУМV быстро формировалось облако плотного топливовоздушного тумана без касания кромкой земли. Зажигание происходило всегда от факела, приставленного к первой форсунке, поэтому запаздывание от момента начала организации упомянутого облака варьировалось в пределах нескольких секунд. Именно этот момент зажигания и воспламенение всего облака согласовывался оператором на установке с оператором на самописце.

Включение электрогенератора влияет посредством «земли» на локальные теллурические токи. Процесс переформатирования электрического поля характеризуется высокой вариабельностью напряженности, но с результирующим квазиэлектростатическим характером. Сигнал с антенны на ленте регистратора представляет собой не «кривую разряда конденсатора», но скорее форму волнового пакета. В таком случае вероятность выделения момента включения электродвигателей трех насосов становится очень высокой.

Примененная методика обработки синхронного перемножения цифровых рядов графических сигналов выдает с некоторой кратности перемножения относительно постоянную реальную картину, приведенную для 9-кратного перемножения (см. рис. 17). При увеличении кратности амплитуды могут меняться, но не их местоположения на временной оси. На рисунке 17 выделены сигналы в условные моменты времени: 90 с, 170 – 180 с и 240 с. Тем самым

фиксируются вполне определенные действия оператора: включение электродвигателя подкачивающего насоса низкого давления, переход 30 м до насосов высокого давления и поочередное включение электродвигателей и выход их на стационарный режим с результирующим зажиганием топливного облака (момент времени 280 с обозначен на рис. 17). В указанные моменты отмечается достоверное (повторяемое) увеличение амплитудных значений и, как следствие, рост среднегеометрического значения, что может означать – нарушение стационарности помеховой обстановки. В последующий период работы ТУМВ на стационарном режиме наблюдается снижение общего уровня помехи по всем каналам. Вариабельность напряженности электрического поля при этом трансформируется в записи на ленте регистратора в виде стохастического процесса. При формирующемся объемном горении составного факела пламени, нарастающем активном, а затем и пассивном участке нагретой струи, организуемой радиационной колонке иного ожидать и не приходится. Когда все составляющие источники генераций сформированы, и вариабельность напряженности должна бы угасать, «включается» и быстро нарастает приграничная циркуляция воздуха около установки. Струя «касается» поверхности земли и замыкается на ней, организуя с циркуляцией системный вихрь. Поэтому интервал времени измерений составляет 10 – 15 минут в зависимости от стратификации слоя атмосферы и метеоусловий. Он ограничен снизу временем формирования тепловой колонки, а сверху – ветровой помехой. Антенны оказываются в собственно струе [112].

Кажущееся снижение амплитуд и даже исчезновение сигналов после момента зажигания (см. рис. 17) можно трактовать при работающей установке двояко. С одной стороны синхронное перемножение даже двух графиков диаграмм стохастических процессов уже дает такой эффект, не говоря уже о девяти кратном перемножении. В этом случае, если говорить о шунтировании, то необходимо добавлять, что это только эффект, и не более того. С другой стороны падение амплитуд сигналов может означать их реальное уменьшение, например, в результате шунтирования вертикальной струей

области тропосферы, сгущения в этой области линий плотности атмосферных токов и соответствующего уменьшения этих токов в окружающих областях. В этой части развитая тепловая колонка факела пламени работает как вертикальный слабый, но протяженный квазиэлектростатический шунтирующий элемент.

Результаты анализа данных по трем приемным каналам и шести опытам регистрации E_z – составляющей на расстоянии 16 км от ТУМВ подтвердили электростатическое генерирование при работе ТУМ в ближнем поле по следующим фактическим признакам:

1. Нарушение стационарности помеховой обстановки на расстоянии 16 км ТУМВ выделяется даже на отдельно взятой реализации по любому каналу регистрации при подготовке к каждому опыту и вплоть до момента зажигания топливовоздушной смеси.

2. В системе единого времени запаздывание момента t_p регистрируемого электрического сигнала относительно момента t_0 зажигания топливовоздушной смеси составило интервал: $t_p - t_0 = 2,2$ с. Этот интервал времени может служить верхним пределом начала отсчета формирования собственного электрического поля составного факела пламени метеотрона [11, 110, 114];

3. На стационарном режиме работы ТУМВ электростатическое генерирование сопровождается вариабельностью напряженности электрического поля в форме стохастических процессов. АКФ спадает на втором – третьем шаге до около-нулевых значений [110]. Методика девятикратного перемножения графиков по трем опытам ожидаемо дает результат-эффект шунтирования сигнала;

4. Результат реального шунтирования помехи подтверждается достоверным уменьшением дисперсии вариаций напряженности естественного электрического поля при работе ТУМВ;

5. Время распада нагретой отрицательно заряженной струи с момента полного гашения пламени определяется по наличию (отсутствию) в спектре узкого пика на частоте 0,08 Гц [112].

Полное описание всех опытов по дневникам авторов с картами размещений антенн и полным спектральным и корреляционным анализ по всем каналам и опытам представлен в книге 4 [110].

1.4.2. Регистрации электрического поля вблизи ТУМВ

Комплексный эксперимент (31.10.1981) [113]. Для решения поставленных задач в рамках углубленного поиска автономных и сопряженных генераторов электрических и акустических полей были проведены опыты по синхронной регистрации вертикальной составляющей напряженности $E_z(t)$ электрического поля, звукового и инфразвукового давления $L(t)$, гидродинамического давления $p(t)$ в системе подачи топлива на форсунках установки на стационарном и переменном режимах работы ТУМВ в системе единого времени (СЕВ) и в частотном диапазоне 0,03 – 100 Гц [1, 2, 6 – 9, 114]. Приемниками регистрируемых сигналов служили: электростатический зонд – вертикальный несимметричный диполь с эффективной высотой $h_{эф} = 1$ м и расположенный на расстоянии 25 м от факела пламени, стационарные приемники звукового и инфразвукового давления [1, 6], расположенные на расстоянии 40 м от факела пламени в кирпичном помещении с размерами $4,5 \times 3 \times 3$ м³ и реохордный датчик магистрального давления топлива. Регистратором служил 16-канальный прибор ЭЭГУ16-02 [1, 113, 114]. На горизонтальных участках амплитудно-частотных характеристик, указанных трех измерительных каналов, чувствительность соответственно составляла: 0,8 мВ/м·мм, 0,06 Па/мм, 10^6 Па/мм [1].

Алгоритм работы ТУМВ. При включении ТУМВ керосин ТС-1 подавался из емкости 120 м³ насосами низкого давления через армированные рукава к системе плунжерных насосов высокого давления [1]. К горелкам [1, 7] приставлялся высокий шест с малым факелом зажигания. Включение насосов высокого давления означало подачу керосина к горелкам с последующим распылением распределенной системой форсунок. При этом организовывалось сплошное, визуальное однородное, приподнятое над поверхностью земли облако топливовоздушной смеси. Его контакт с малым факелом приводил к воспламенению облака и, в дальнейшем, к формированию и установлению устойчивого составного сплошного факела пламени объемного горения [1, 2, 7, 110]. В течение 2 – 3 минут производительность насосов высокого давления выводилась на но-

минальный стационарный уровень 100 атм, соответствующий номинальному режиму работы ТУМВ [1, 2]. При этом давлении или немногим ниже (до 90 атм) начинался переменный режим работы на частоте модуляции давления подачи топлива в магистральной топливной сети 0,08 Гц перед системой форсунок. После этого на короткое время (от 5 до 30 с) ТУМВ выводилось на стационарный режим работы с последующим переходом на каждую следующую частоту модуляции в порядке возрастания: 0, 17, 0,42, 0, 91 Гц.

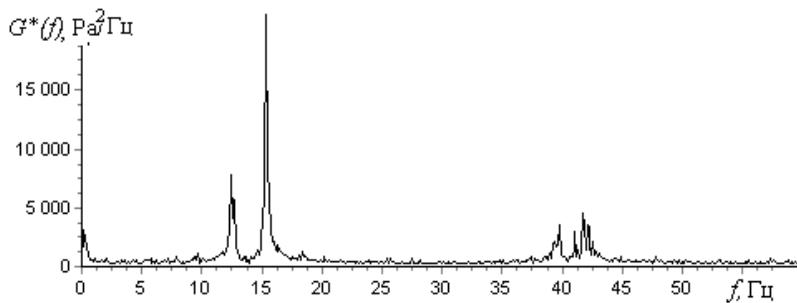
Результаты регистрации, обработки и анализа. К обработке и анализу на ленте записи опыта были выбраны 7 характерных участков (диаграмм). Объем выборки определялся стационарным характером участка во временной форме Δt с, или размером N цифрового ряда. Первый участок на ленте отсчитывался от момента зажигания (66 с), характеризовался монотонно растущим давлением подачи топлива от 30 атм до 75 атм и соответствовал несформированному объему горения сплошного факела пламени, несформированному пассивному участку струи и сформированному, но не разогретому активному участку струи. На 73 секунде от момента зажигания на ленте обозначено начало участка 3 при записи которого давление подачи топлива на форсунки ТУМВ продолжало нарастать до 90 атм. Участок 2 начинается на 148 с и записывается при постоянном давлении подачи топлива (около 90 атм), далее, ТУМВ вышла на номинальный режим работы (прил. 2).

Участки 1, 2 записаны на ленте с одинаковой скоростью (120 мм/с) лентопротяжного механизма и имеют длину записи 8 с и 8,13 с. Таким образом, работу ТУМВ при выходе на стационарный режим и работе на нем представляют 3 участка. Участок 1 характеризует монотонный рост давления подачи топлива и начало формирования факела и струи. Участок 3 характеризует продолжение монотонного роста давления с выходом на номинальный режим работы при сформированном объеме горения сплошного факела пламени. Участок 2 работы на номинальном режиме сформированного сплошного факела и активного участка нагретой струи и радиационного конуса вертикального прогрева приземного слоя после 2,5 минут работы.

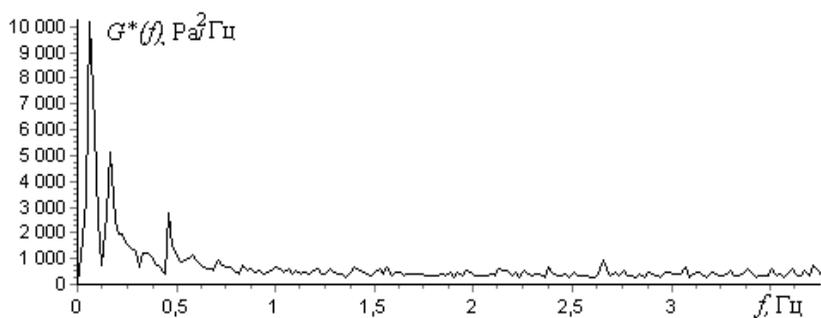
Большой по времени записи участок 3 потребовался для детализации и анализа участка около-нулевых частот при стационарной работе ТУМВ. При времени записи 48 с скорость лентопротяжного механизма составляла 7,5 мм/с, что позволяло провести частотный анализ на шкале 0,01 – 3, 75 Гц (см. рис. 12 б, 13 б). Основная доля энергии в генерируемых на стационарном режиме работы ТУМВ акустическом и электрическом полях КНЧ диапазона приходится на 0 – 50 Гц и на 0 – 1 Гц. Выделяемый в звуковом диапазоне акустический интервал $(3 \div 5) \cdot 10^3$ Гц с максимумом плотности мощности обосновывался энергетическим эффектом механизма мольного голения [103] и, далее не подпадал под анализ.

СПМ рассматриваемых процессов при работе установки на стационарном режиме рассчитаны по автокорреляционной функции (АКФ) с применением прямоугольного временного «окна» [99] и имеют вид гладких кривых $G^*(f)$, выделяющих лишь максимальные, одинаковые по порядку величины значения, на частотной шкале (рис. 18, 19). Иные экстремумы сглаживаются. Приращение частотной шкалы до 180 Гц уменьшением шага дискретизации не выявило никаких генераций. Это требует пояснения. При ручной обработке записи сигнала минимальный шаг дискретизации 0,00834 с при скорости протяжки 120 мм/с и 0,134 с при скорости протяжки 7,5 мм/с, а при компьютерной: 0,00279 с при скорости протяжки 120 мм/с и 0,0446 с при скорости протяжки 7,5 мм/с, т.е. соответственно в 3 раза больше. Очевидно, что при компьютерной обработке число данных и частотная шкала длиннее почти в 3 раза. Ясно, что запись ручной обработки в три раза разрежена, но на общих участках временной и частотной шкал графики АКФ и СПМ (спектра АКФ) качественно и количественно практически одинаковы. Это придает статус достоверности ранее опубликованным данным анализа ручной обработки [110, 115 – 117].

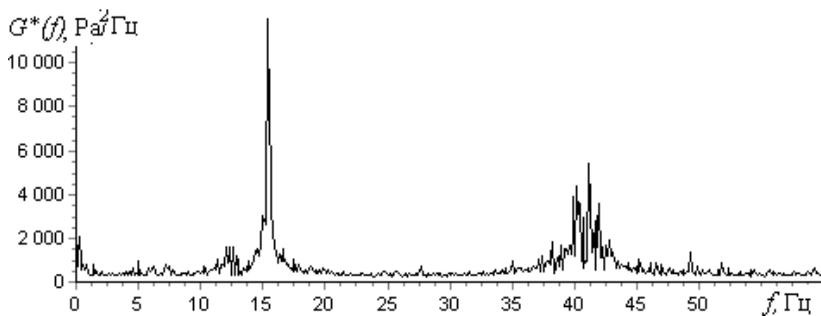
При заданной очередности участков обработки 1 – 3 – 2, следует, что участок 1 – первый, а 2 – последний. Тогда при одинаковой длине участок 8 с видно, что со временем амплитуда пиков на 12 Гц и 16 Гц падает почти в два раза, а на 40 – 42 Гц – неизменна.



a



б



в

Рис. 18. Спектры плотности мощности уровней звукового давления L , Pa по участкам: 1 (*a*), 3 (*б*) и 2 (*в*)

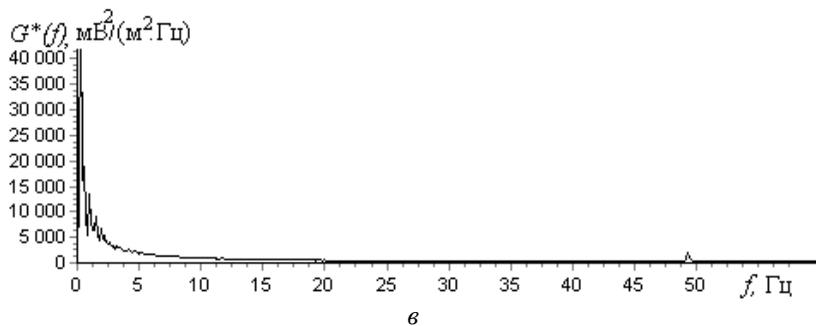
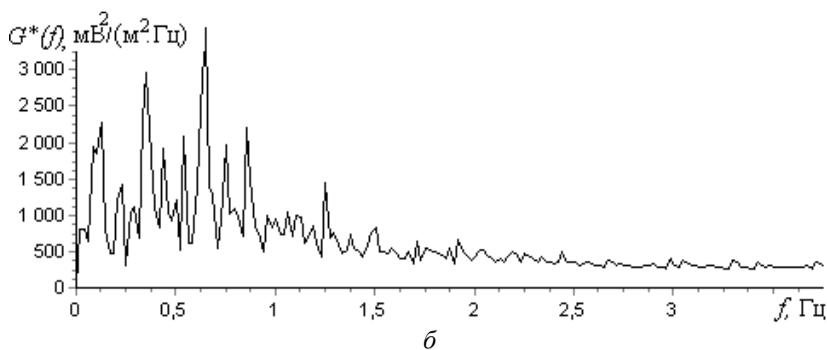
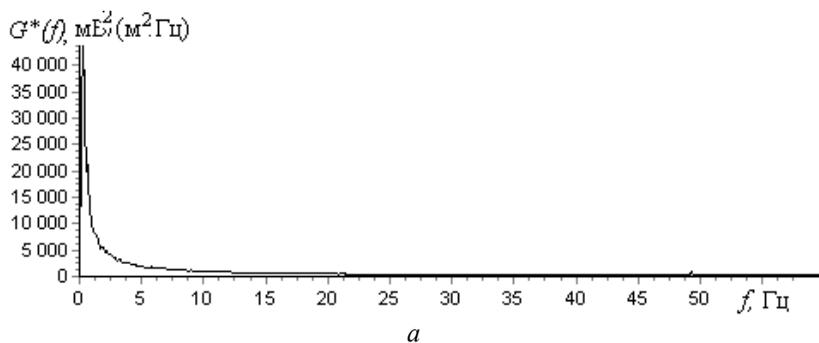


Рис. 19. Спектры плотности мощности напряженности электрического поля, E , В/м по участкам: 1 (а), 3 (б) и 2 (в)

В диапазоне геоакустических процессов на около-нулевых частотах СПМ инфразвукового давления и напряженности электрического поля имеют максимальные плотности мощности. При длине записи 8 с левая граничная частота (частота Найквиста) не может быть меньше 0,0625 Гц. На всех СПМ выделяется пик на частоте 0,08 Гц. Участок 3 длительностью 48 с позволяет сместить левую границу спектра до 0,01 Гц, предоставляя возможность для анализа частотного интервала 0,01 – 1 Гц. Это позволило выделить узкие резонансные области с индивидуальными особенностями (рис. 18, 19). Участок спектра 0 – 0,5 Гц представлен «гребенкой» гармоник, но качественно разной для процесса $L(t)$ (рис.18 б) для процесса $E_z(t)$ (рис. 19 б). Наиболее длинноволновый процесс выделяется на обоих спектрах с характерной частотой 0,08 Гц, однако его трансформация на гармоники для акустического L -поля и электрического E -поля представлена по-разному. Так, для акустического поля проявляются первая (0,08 Гц), вторая (0,16 Гц) и шестая (0,48 Гц) гармоники, третья и пятая – подавлены, а четвертая (0,32 Гц) – «поглощена» (провал на линии спектра).

Если в динамике физических параметров $L(t)$ и $E(t)$ эти незначительные изменения практически не отражены, то динамика математических процедур тех же функций эти изменения чувствует, например: логарифм отношения при переводе в уровни звукового давления (дБ) и степенная функция отношений при переводе в интенсивность ($\text{Вт}/\text{м}^2$) выделяют на АКФ устойчивые участки амплитудных модуляций, а на спектрах АКФ – кратные заданной частоты, причем – в обе стороны (рис. 20). Математические процедуры над физическим параметром приводит к эффекту выделения сигналов, свойственному кепстральному анализу [118]. СПМ инфразвукового давления (p , Па) и СПМ уровней (L , дБ) и интенсивности (I , $\text{Вт}/\text{м}^2$) инфразвукового давления приведены на рис. 18 в и 20 а, б, соответственно. На рис. 18 в выделяются малые пики на частотах: около-нулевых, 5 Гц, 12 Гц, 15 – 16 Гц, 40 – 42 Гц. На рис. 20 а СПМ близок к широкополосному с максимумом на 1 – 2 Гц, а на рис. 20 б выделяются 0,08 Гц, 11 – 12 Гц 26 Гц, 38 Гц 52 Гц и 58 Гц.

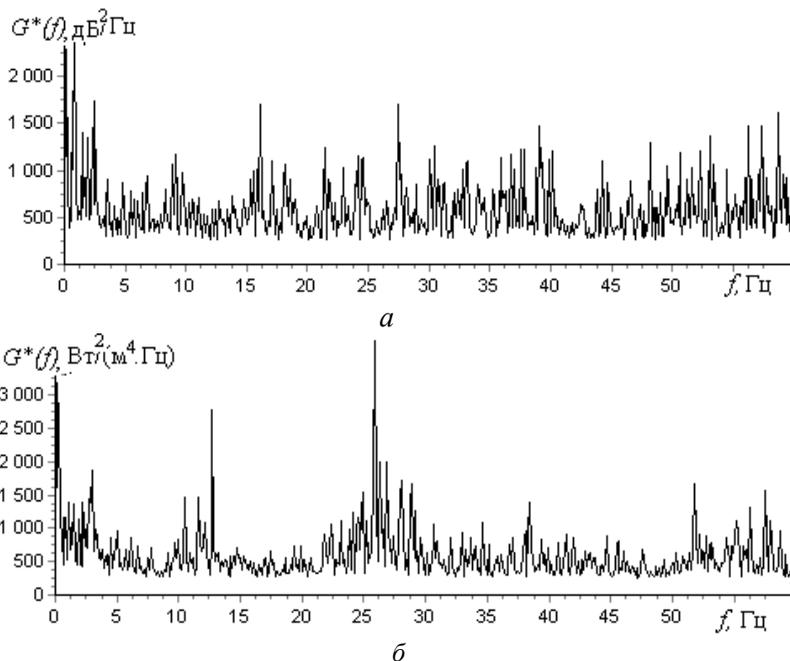
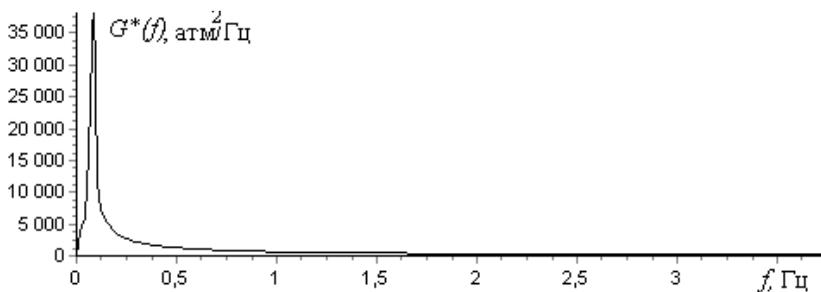
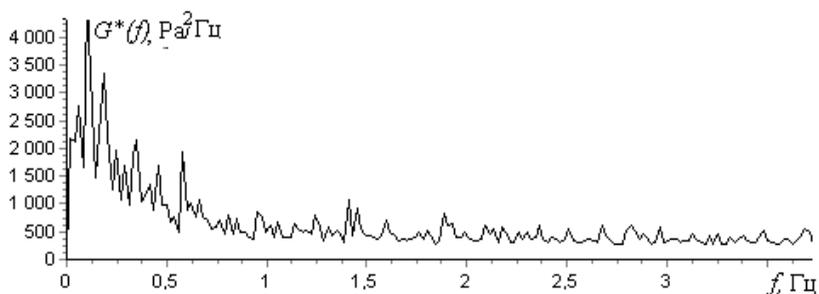


Рис. 20. Спектры плотности мощности по записи регистрации 31.10. 81. участка 2: уровни звукового давления L , дБ (а), интенсивность звукового давления I , Вт/м² (б)

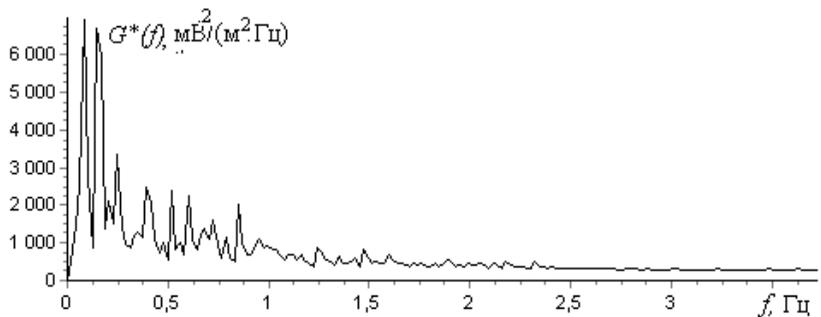
Близкий к гармоническому режим изменения давления подачи топлива на форсунках горелок и реакции факела объемного горения на разные частоты включался по окончании третьей минуты (на 173 с записи) работы на стационарном режиме. Переменный режим работы ТУМВ в опыте 31.10.81 задавался ручным синхронным (одной рукояткой оператора) изменением производительности обоих магистральных насосов высокого давления по синусоидальному закону. В направлении номеров участков 4 – 7 частота переменной производительности насосов высокого давления растет (прил. 2). На частоте 0,08 Гц факел угасал за полпериода (12,5 с), а амплитуда инфразвукового давления снижалась до уровня помехи (прил. 2, рис. 2П5). При 0,17 Гц (участок 5) – факел пламени угасал на полупериоде 3 с.



a



б



в

Рис. 21. Спектры плотности мощности по записи регистрации 31.10. 81. участка 4 ($\langle f_M \rangle = 0,08$ Гц): давление подачи топлива (*a*), инфразвуковое давление (*б*); напряженность электрического поля E , В/м (*в*)

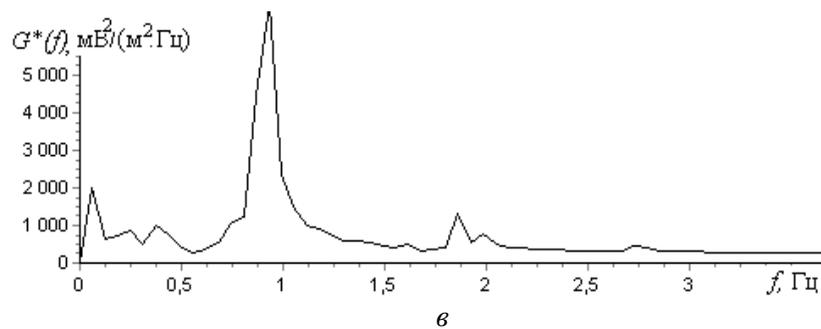
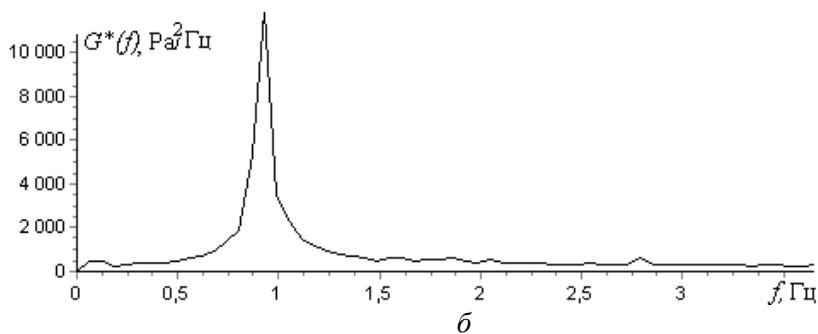
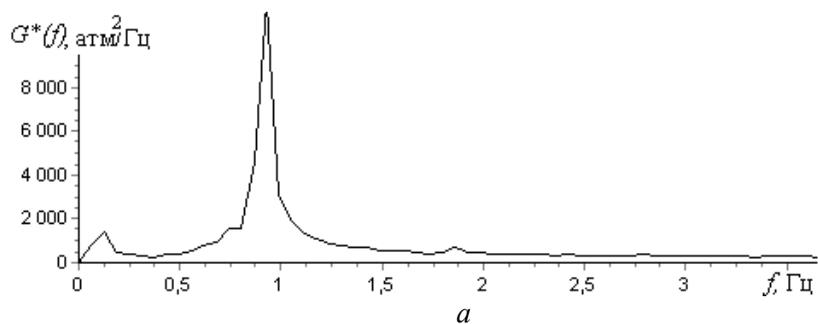


Рис. 22. Спектры плотности мощности по записи регистрации 31.10. 81. участка 7 ($\langle f_M \rangle = 0,92$ Гц): давление подачи топлива (*a*), инфразвуковое давление (*б*); напряженность электрического поля E , В/м (*в*)

Если на низких частотах (0,08 Гц и 0,17 Гц) характер записи инфразвукового давления определен амплитудной модуляцией (рис. 21), то, начиная с 0,4 Гц, характер меняет качество. Факел пламени не успевает гаснуть и пульсирует. Верхняя и нижняя огибающие графика записи инфразвука начинают меняться синхронно уже на частоте 0,5 Гц, а на частоте 0,92 Гц это закономерность проявляется в полной мере, но при значительно меньшей глубине модуляции (рис. 22). Глубина модуляции получается естественным образом системно зависимой от частоты по интервалам времени воспламенения, прогорания и характера смешивания топливовоздушной смеси.

Любопытно, что если для полигона инфразвукового давления (L , Па) характерно арксинусоидальное распределение, то для полигона того же параметра и ряда (L , дБ) – распределение Пуассона, а для поля E – сильное приближение к нормальному закону распределения Гаусса [110].

Склонность экспериментального полигона к классу арксинусоидальных распределений свидетельствует об устойчивой гармонической составляющей сигнала. Участки амплитудных модуляций на АКФ образуются двумя частотными процессами (12 Гц и 15,5 Гц). Обращает внимание быстрое затухание АКФ, или невыраженное самоподобие системного процесса, определяемого участками записи 1 – 3. На участке 3 записи инфразвукового давления (прил. 2) удалось выделить причину невыраженного самоподобия - превалирование на записи реализации процессов переходов «сгущение – разряжение», определяющих по форме аperiodическую частотную модуляцию. На первой половине соответствующей записи E -поля – амплитудная модуляция с частотой около 0,1 Гц. Компьютерная версия обработки этих же участков подтвердило вышесказанное в деталях, добавляя лишь на удлинённой втрое (при меньшем шаге дискретизации) частотной шкале отсутствие сигналов выше 45 Гц.

Результаты анализа работы метеотрона на стационарном режиме свидетельствуют о сильном и неоднозначном влиянии на локальное электрическое поле, как пламени, так и вертикальной нагретой струи с максимумом выделяемой спектральной плотности мощности, приходящейся на 0,08 Гц и, далее, на около-нулевые ча-

стоты. Но при включении и выключении струи, а также при проведении дисперсионного анализа посредством этого влияния была замечена инерционность реакции струи и пламени на действия оператора установки. Локальное электрическое поле с задержкой появлялось при пуске ТУМВ и с иной задержкой исчезало при выключении.

Для установки и исследования этого эффекта было решено воспользоваться переменным режимом работы ТУМВ, не меняя режим работы электродвигателей насосов. Качественный характер изменения Δp_{ϕ} задавался изменением производительности насосов и был один и тот же – периодический, непрерывный на разных средне-выборочных частотах модуляции: 0,08 Гц, 0,17 Гц, 0,42 Гц и 0, 91 Гц. Визуально наблюдаемые изменения структуры и объема пламени также разные. Так с ростом частоты модуляции расхода (по давлению) топлива глубина модуляции объема пламени меняется от 100 % до 70 %, а структура переходит от объемного горения к составному горению отдельных форсуночных факелов. Иными словами, на малых частотах модуляции пламя успевает гаснуть полностью, а на условно больших – лишь пригашается. В этом же направлении топливная фракция при регистрации выражена на временной оси все меньше за счет превалирования пламенной структуры, а нагретая струя от четочной структуры последовательности термиком стремится слиться с формированием непрерывного активного участка. Очевидно, что структура исследуемого генератора вариаций напряженности электрического поля непостоянна не только в течение одного и того же эксперимента для определенного периода колебаний $\Delta p_{\phi}(t)$, но и существенно различается в разных экспериментах (для различных частот модуляции Δp_{ϕ}). При смене динамики формирования структуры излучателя вполне резонно ожидать количественных и даже качественных изменений динамики генерации и формирования локального и регистрируемого электрического поля.

На участках 4 – 7 (рис. 23) замечаем инерционный характер подстройки E -поля под внешний фактор частотной модуляции объема факела пламени. Так на участке 7 подстройка к задаваемой частоте формированием колебаний происходит в течение 3 – 4 с.

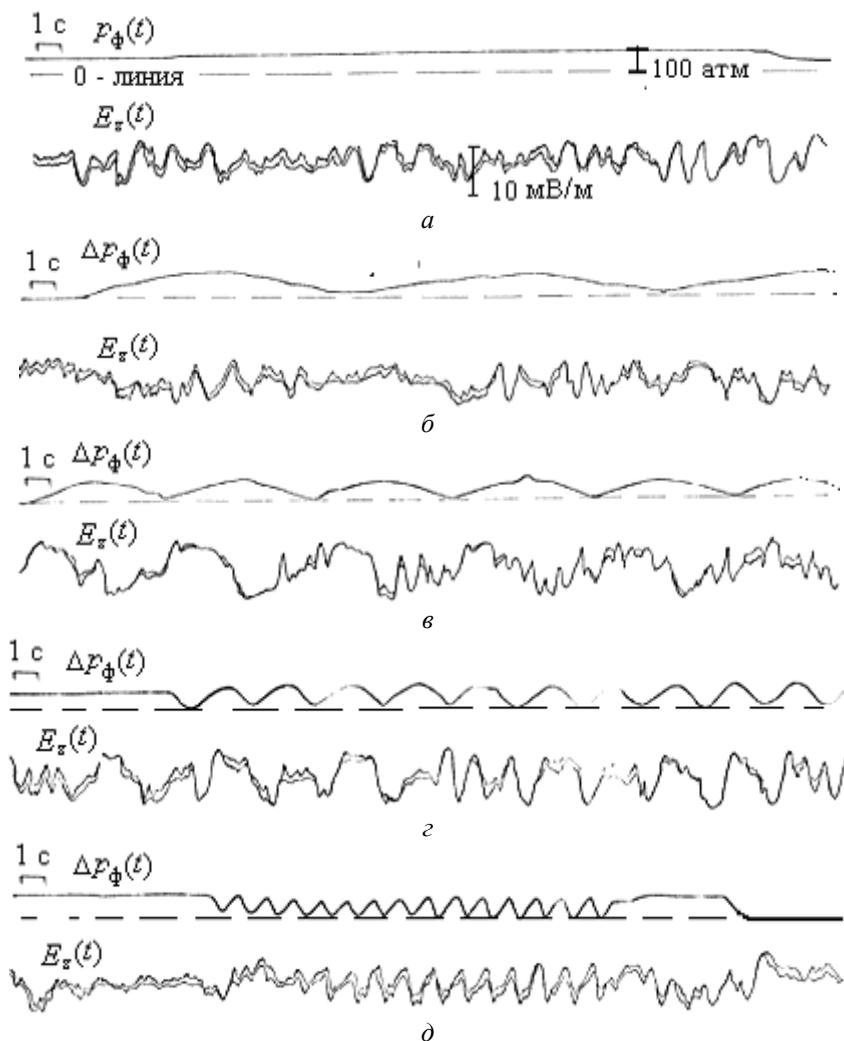


Рис. 23. Компьютерные версии копий участков единой диаграммы регистраций давления $p_{\phi}(t)$ подачи топлива на форсунки ТУМV и E_z -составляющей электрического поля на стационарном (а) и переменном режиме работы ТУМV на средне-выборочных частотах модуляции f_m : 0,08 Гц (б), 0,17 Гц (в), 0,42 Гц (з) и 0,92 Гц (д). Масштаб выдержан одинаков

Помеховая обстановка до и после опыта. Эксперименты проводились днем в сухую, солнечную, безветренную погоду при температуре 0°C (октябрь) и давлении 750 мм рт. ст. Метеообстановка до начала первого эксперимента (10 часов 00 минут): солнечная устойчивая погода, температура $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, скорость ветра 0 – 0,5 м/с, направление ветра северо-западное, влажность 85 %, давление 747 мм.рт.ст. Участок 0 – участок помехи до работы ТУМ считается исходным невозмущенным по любому физическому параметру и слабо выражен по средним уровням $\langle L \rangle = 0,16$ Па и $\langle E \rangle = 0,2 - 0,4$ мВ/м, однако имеет нестационарный характер на 87 секундах записи (прил. 2, рис. 1П1), выраженный максимум на около-нулевых частотах (рис. 24 а) и приближение к распределению Гаусса по параметру L (рис. 25 а).

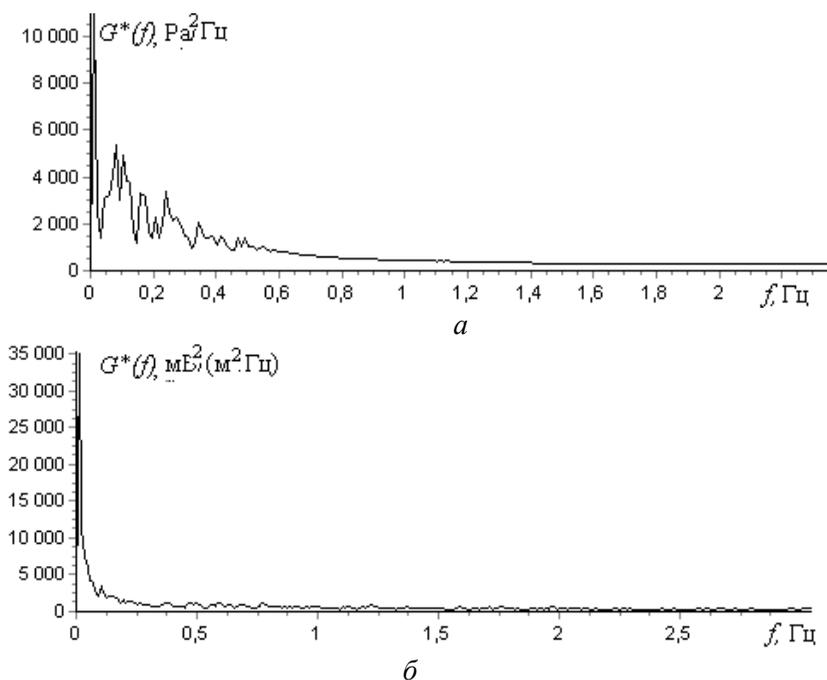


Рис. 24. СПМ записи помехи до работы ТУМ 31.10. 81. Участок 0: инфразвуковое давление L , Па (а); напряженность E - поля, В/м (б)

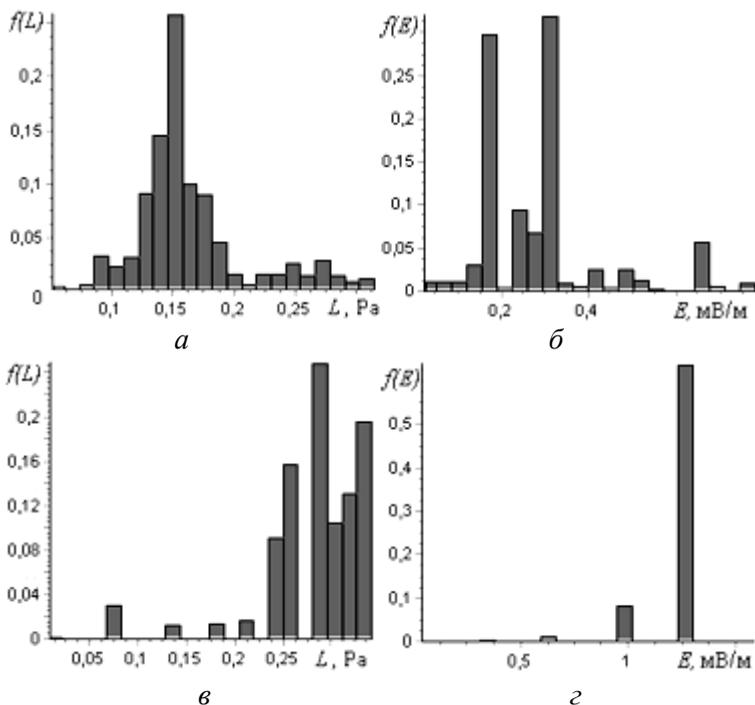
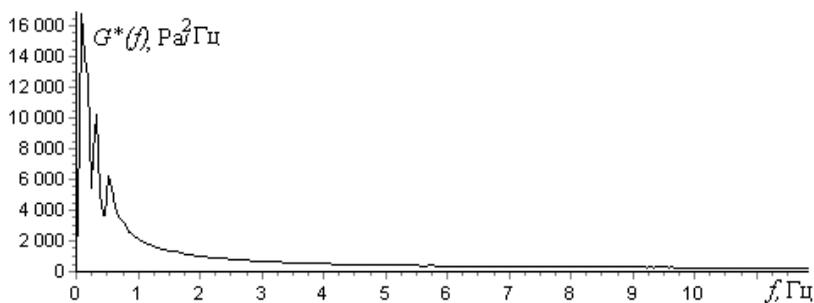


Рис. 25. Гистограммы $f(L)$ (а, в) и $f(E)$ (б, г), представляющие распределение относительных частот (f) величин параметров L и E на временной диаграмме записи рис. 20 а, (а, б) и рис. 20 б (в, г), соответственно

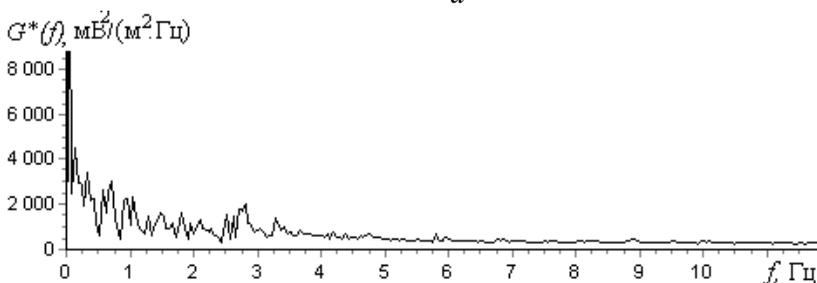
Несформированное распределение по параметру E (рис. 25 б) можно объяснить наиболее распространенной причиной изменения напряженности на малых частотах и малых амплитудах – ветровой нагрузкой. Даже слабое «длинное» изменение скорости ветра в области антенны приведет к устойчивым малым эффектам соответствующего изменения квазиэлектростатического поля с характерной частотой не выше 0,01 Гц, являющейся, как известно, граничной частотой геоакустических и геоэлектрических волновых процессов [61, 62, 65, 94, 95].

Участок 8 – участок помехи через 5 с после выключения ТУМ считается конечным и слабо возмущенным по исследуемым

физическим параметрам. Формы гистограмм уровней L инфразвукового давления (рис. 25 в) и напряженности E (рис. 25 з) указывают на возмущение последствия акустического и электрического полей после работы ТУМ имеющее одинаковую ритмическую компоненту, выделяемую в узкой частотной области 0,08 – 0,1 Гц (рис. 26 а, б). Оба поля заданы практически максимальными значениями $E = 1,2$ мВ/м и $L = 0,25$ Па для невозмущенной помеховой обстановки до работы ТУМ. Такое одинаково слабое (на уровне максимальной помехи) влияние может быть вызвано наличием наклонной нагретой слабо заряженной «верной» струи над приемниками обоих сигналов.



а



б

Рис. 26. СПМ записи помехи после работы ТУМ 31.10. 81. Участок 8: инфразвуковое давление L , Па (а); напряженность E - поля, В/м (б)

По сравнению с невозмущенным участком 0 на участке 8 характер изменения инфразвукового давления более длинноволновый (сглаженный), а уровень вариаций напряженности E поля от начала участка записи падает до практически нулевых значений. Если принять данный результат за проявление фактора инерционности шунтирующего механизма с длинноволновым восстановлением, то приходится признать саму динамику инерционного, т.е. массового объекта. Это может быть либо струя – в форме убывающего термика с растущим плечом, либо система приземного аэрозоля [119, 120], деформированного циркуляционным течением и тепловой радиацией [2]. Получаемый эффект можно сравнить с акустическим и электрическим экранированием динамически релаксирующей структурой. «Евстахиева труба» пограничного слоя еще не открылась, но обязательно откроется вертикальным прорывом «веера» наклонной струи.

Результаты спектрального анализа сведены в таблицу 3 [121].

Таблица 3. Результаты параметрического спектрального анализа

Помеховая обстановка до работы ТУМ. Участки обработки 0		
Параметр	Характер колебаний	На частотной оси
$L(t)$, Па	Длинноволновые аperiodические возмущения	0,01 Гц
$E_z(\tau)$, мВ/м		
Стационарный режим работы ТУМ. Участки 1, 2, 3.		
$L(t)$, Па	Периодические мало-амплитудные	0,08÷0,1 Гц
	Почти периодические, с биениями	12 и 16 Гц
	Периодические мало-амплитудные	40÷42 Гц
$E_z(\tau)$, мВ/м	Периодические, выраженные	0,08 ÷0,1 Гц
	Гармоники от основной 0,08 Гц	0,16, 0,32, 0,48 Гц
Переменный режим работы ТУМ. Участки 4 – 7.		
$L(t)$, Па	инерционный характер подстройки под	0,08 Гц, 0,17 Гц,
$E_z(\tau)$, мВ/м		
Помеховая обстановка после работы ТУМ. Участки обработки 8		
$L(t)$, Па	Возмущение со слабыми гармониками	0,08 – 0,1 Гц
$E_z(\tau)$, мВ/м	Последствие. Шунтирующий эффект	

Примечание. Для всех участков переменного режима работы выделяется пик на частоте 0,08 Гц; на частоте модуляции 0,08 Гц – пик наивысший.

Обсуждение результатов опыта 31.10.81. До работы ТУМ акустическое и электрическое поля имеют геофизическую природу возмущения (помехи) в около-нулевом частотном диапазоне. Фактором tcntcndtyuuj возмущения является орографическая ветровая составляющая при заданном составе аэрозоля и размещении эффективного сечения антенны на заданном постоянном уровне. Орографическая составляющая выделяется на частотах ниже назначенного предела 0,01 Гц, границы геоакустического диапазона [95]. В направлении участков 1 – 3 – 2 амплитуда вариаций напряженности E -поля монотонно растет с ростом давления p подачи топлива на форсунки. При этом параметр инфразвукового давления успевает сформировать нормальный закон распределения, а параметр напряженности E -поля – нет. Даже в невозмущенном состоянии для формирования функции распределения параметра E нужен значительно больший по размеру ряд. Длины записи 8 с при исследовании КНЧ диапазона явно недостаточно для формирования соответствующего распределения, однако о приближении цифрового ряда дифференциальной напряженности E -поля к нормальному закону распределения, можно достоверно утверждать и при стационарной работе ТУМ, и при линейном росте давления p подачи топлива. Кроме того, следует учесть, что регистрируется и анализируется не сам параметр E (амплитуда), а скорость его изменения – дифференциальный ряд. Основываясь на АЧХ приемного блока, полученной в калибровочном поле плоского конденсатора однородного вертикального электрического поля [2, 75] приемная антенна с заданной АЧХ [1] может зарегистрировать только изменения (вариации) dE_z/dt вертикальной составляющей напряженности электрического поля. При помеховой обстановке вариабельность электрического поля практически не выражена. Иными словами, само поле принимает черты квазиэлектростатического, или электрического с эффектом шунтирования. Такой же эффект, очевидно, должен создавать любой стационарно размещенный объект, с постоянным пространственным распределением электрического заряда. В нашем случае такому объекту в некотором смысле соответствует как активный и

пассивный участки струи, так и в меньшей степени тепловая колонка. Если отрицательный электрический заряд струи генерируется постоянно в факеле пламени и переносится на малых сажевых частицах [1, 2], то в тепловой колонке основным физическим процессом является теплопередача, и ожидать сопоставимого по концентрации электрического заряда не приходится. Тем не менее, в тепловой колонке крупные частицы из спектра активного участка вообще отсутствуют, поэтому практически отсутствует и положительный электрический заряд. Малыми частицами большей подвижности переносится отрицательный электрический заряд. Как видим, конвекционный теплоперенос в обоих случаях в большей или меньшей степени присутствует, соответствуя по динамической структуре ионно-конвекционному генератору [122 – 125].

Аккумуляция некомпенсированных отрицательных зарядов в нагретой струе в условиях натурного эксперимента происходит по механизму «дифференцированного транспортера»: отрицательные ионы – «снизу – вверх» в приосевой области струи, положительные ионы – вниз к поверхности земли или на конструкцию установки по периферии факела и струи. Для сохранения электрического знака заряда, как и самих зарядов, их подвижности должны быть относительно малы. Наиболее вероятным решением является либо налипание ионов в пламени на более крупные частицы (большой массы), либо зарядка крупных частиц при взаимодействии с другими частицами. Транспортом отрицательных зарядов, создающих избыток объемной плотности в нагретой струе, являются относительно крупные отоженные пылевые частицы, частицы сажи и частицы воды [2, 22, 47, 55, 56]. Пылевые частицы участвуют в основном в периферийном конвекционном движении в тепловой струе и предположить их механизм зарядки в холодном режиме затруднительно; молекулы воды диссоциируют в объеме пламени, при этом ионы H^+ и OH^- активно участвуют в образовании радикалов и процессах хемионизации. Очевидно, что наиболее распространенным и вероятным транспортом некомпенсированных зарядов могут быть «рожденные» в объеме пламени сажевые частицы. Процесс их зарядки

вероятнее всего предположить в объеме пламени при относительно высоких температурах (до 1500 К). В зоне высоких температур сажевые частицы имеют малые размеры, и время жизни, как транспортеров ионов, незначительно. Поэтому, нагретая струя как ионно-конвективный генератор, образуется в основном из сажевых частиц периферийных областей пламени [126]. Центральная часть (осевая) струи является «реактором» радиационной колонки и уже на незначительном удалении от источника содержит малые частицы сажи и их радикалы большой подвижности, которые, как известно, могут нести лишь единицы отрицательных элементарных электрических зарядов [47, 60]. Центральная часть выполняет также роль вовлечения вихреобразованием в поступательное приосевое движение сажевых частиц периферийных областей.

Механизм формирования и работы ионно-конвекционного генератора можно смоделировать по известным фактам [78, 126]:

1. Транспортом зарядов обоих знаков являются сажевые частицы [29, 32];

2. Крупные частицы сажи в основном заряжены положительно, мелкие – отрицательно [2, 22, 29, 47, 55, 56];

3. Механизм зарядки мелких частиц в некотором слое объема пламени – положительная поверхностная ионизация адатомов калия на их поверхности [2, 57, 127];

4. Газодинамическое разделение сажевых частиц по дисперсности в струе по горизонтали: крупные – на периферию [22];

5. Гравитационное разделение сажевых частиц по дисперсности по вертикали: крупные частицы движутся вниз, малые – вверх;

6. Электрическое разделение сажевых частиц по электрическому знаку заряда в естественном электрическом поле Земли не противоречит, но способствует гравитационному разделению: положительные преимущественно крупные частицы движутся вниз, отрицательные малые частицы – вверх.

Исходя из этой физической модели механизма при устойчивой стратификации приземного слоя в условиях полного штиля, при работе установки метеотрона на стационарном режиме, не следует

ожидать формирования вертикального пассивного участка струи. В таком модельном представлении пассивный участок струи со слабой и уменьшающейся по длине плавучестью медленно поднимается с малым наклоном против вращения Земли. Подъем будет продолжаться вплоть до касания слоя изотермии с последующей аккумуляцией отрицательного заряда на поверхности слоя в форме несимметричного облака, в форме следа мелкодисперсных сажевых частиц и создание электростатического экрана с постоянной напряженностью локального поля. При заданной тепловой мощности установки и измерениях вблизи тепловой струи (под экраном) следует ожидать эффекта шунтирования естественного ЭМП Земли. Такого же эффекта, но более слабого следует ожидать при измерениях на значительных расстояниях от струи, но только при удалении в направлении против вращения Земли. Поправки в модель внесет ветровой сдвиг и направление «розы ветров» [7, 11, 110].

При указанных сопутствующих условиях эффект шунтирования струей – источником собственного квазиэлектростатического поля начинает формирование не ранее чем, после шестидесятой секунды работы метеотрона [11]. Это время может служить характерным временем формирования («включения») собственного стационарного электрического поля газодинамической системы в форме «гриба»: «струя – радиационная колонка – сажевый тонкий слой снизу на слое изотермии». При отрицательно заряженной поверхности земли в области измерений формируется электростатическое поле нулевой напряженности. В таком случае сигнал с антенны на записи будет нулевым, что и составит эффект шунтирования вариаций локального поля. Описанная выше ситуация названа идеальной, но является отнюдь не редкой. Авторы не раз наблюдали и даже сфотографировали [1] систему формы «гриб» при тихой походе, которая характерна осенью при формировании или уже сформированном слое изотермии. Такая система устойчиво формируется над трубами тепловых электростанций. Тем не менее, создать такую систему над метеотроном, не реально. Тепловая колонка и струя не изолированы от пограничного слоя атмосферы и всегда стремится

наклониться в сторону, противоположную вращению Земли с приобретением при относительно малой вертикальной скорости, слабую закрутку. Иные факторы влияния также вполне очевидны, например, ветровой сдвиг по высоте. В любом случае развитый пассивный участок нагретой струи будет отклоняться от вертикали, «прижимаясь» к поверхности земли с учетом или без учета ветрового сдвига. Напряженная система с одним мягко закрепленным концом и другим – свободным совершает естественные малые поперечные колебания с собственным периодом. Такие флуктуации придают ранее конусной струе «веерную» форму, накрывающую значительную площадь над поверхностью земли. В этом случае активный участок совпадает с радиационной тепловой колонкой, а пассивный отклоняется от нее.

В части реальной модели механизм генерации собственного локального электрического поля – ионно-конвекционный генератор на сажевых частицах [2, 78, 113, 122 – 128] предлагается рассматривать тройным: транспорт ионов в активном участке нагретой струи на относительно малых высотах (до 100 м) с продольными электрогазодинамическими колебаниями; транспорт ионов на пассивном «веерном» участке с поперечными собственными колебаниями; радиационный тепловой конус (колонка), заметный визуально лишь по температурной рефракции, со слабым поступательным (спираль с большим шагом) перемещением самых малых частиц. Иными словами, наиболее вероятными ответственными за вышеуказанные процессы генераций продольных пульсаций на активном участке нагретой струи являются крупномасштабные турбулентные сажевые образования (термики) на периферии очага, собственно нагретая струя и немассовая тепловая колонка.

Анализ СПМ записей реализаций $E_z(\tau)$ на стационарном режиме работы ТУМ выделил генерации вариаций E_z -составляющей с частотами: 0,08 Гц и 1 Гц. Источник генерации интервала 0,5 – 1,5 Гц, на который приходится значительная доля спектральной энергии, трактовался как «очаг – спонтанный термик» со средней частотой около 1 Гц аperiodических «срывов», что косвенно подтвер-

ждается минимальным временем задержки сигнала, приходящимся на 0,5 Гц. Вероятно, для аккумуляции и «срыва» приосевого термина интервал времени ~ 2 с оптимален.

Как при переходе от стационарного режима с уже сформированной струей и радиационным конусом к переменному режиму работы [1, 110, 113] ТУМВ, так и при резком выключении установки выделяется один и тот же интервал времени (12,5 с). Особенно, он отчетлив на ККФ пар процессов участка 4 (см. рис. 21, 23 и 27), характеризуемого колебаниями мощности тепловыделения с глубокой модуляцией (по изменению объема факела пламени) до 100% и частотой модуляции 0,08 Гц (см. рис. 21 б). Заметим, что интервал времени 12,5 с отвечает этой же частоте, т.е. равен среднему периоду модуляции в первом случае, как интервал времени формирования четочной струи, состоящей из совокупности термиков, перемежающихся по ранее выбранной траектории струи, во втором случае – при выключении.

Вернемся к рис. 23 и обратим внимание на пары графиков, расположенные в последовательности очередности участков («сверху – вниз») на диаграмме регистрации. Во всех случаях сначала формируется стационарный режим (см. рис. 23 а), затем, участки переменного давления с ростом частоты модуляции от 0,08 Гц (см. рис. 23 б) до 0,91 Гц (см. рис. 23 д). Иными словами, функция $\Delta p_{\phi}(t)$ с начала модуляций всегда представлена косинусоидой. Для демонстрации форм variability электрического поля участки показаны не с начала (см. рис. 23 б, в), т.е. формирование отклика срезано (полный сигнал см. в прил. 2). Начало формирования отклика всегда «закамуфлировано», а при окончании формирования отклика $E_z(t)$ очевидно однополярное поведение перьев самописца с запаздыванием по дорожке записи $E_z(t)$ (см. рис. 23 и прил. 2).

Графики ККФ R_{XY} вида R_{EzPm} для указанных четырех опытов в диапазоне частот $0,05 \text{ Гц} < f_m < 1,0 \text{ Гц}$ и с 30-процентной погрешностью по четырем участкам диаграммы, или четырем последовательно проведенным опытам, представлены на рис. 27.

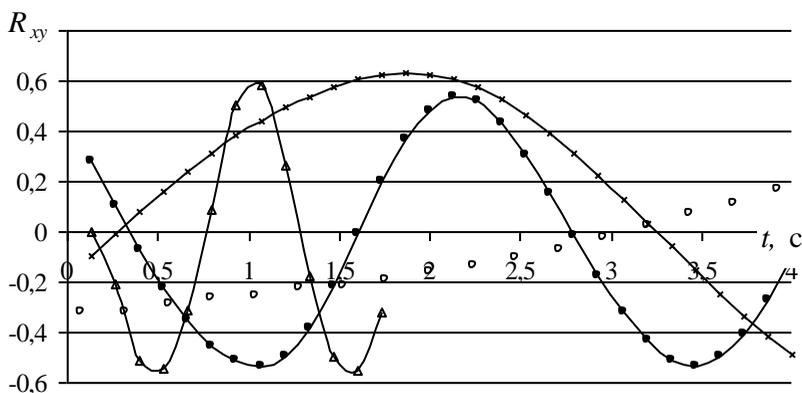
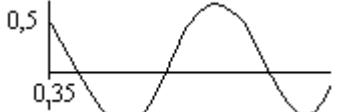


Рис. 27. Графики ККФ параметрических рядов $E_z(t)$ и $p_m(t)$ по четырем участкам диаграммы записи переменного режима работы при частоте модуляции: 0,08 Гц (o), 0,17 Гц (x), 0,42 Гц (•) и 0,91 Гц (Δ)

По записи стационарного режима работы ТУМВ график ККФ имеет вид стохастической связи на всем участке с выделением максимума ниже уровня 0,1 на частоте 0,08 Гц. Поэтому этот опыт с частотой естественной помехи из дальнейшего анализа и рассмотрения был исключен.

Характеристики статистического сопряжения процессов периодического изменения давления подачи топлива на форсунки горелочных устройств ТУМВ и сигнала с антенны, принимающей E_z -составляющую электрического поля вблизи ТУМВ, отчетливо видны на рис. 27 и вынесены в соответствующие ячейки табл. 4 в виде соответствующих характеристик кросскорреляционных функций R_{EzPm} . Характерные интервалы времени задержек даны на схемах участков графиков рис. 27 при пересечении временной оси при общем положении реакционный отклик ($E_z(t)$) не должен опережать причинный стимул ($\Delta p_\Phi(t)$). При этом возникает неопределенность иного сорта, а именно: сигнал с антенны отслеживает $E_z(t)$ или $\partial E_z(t)/\partial t$?

Таблица 4. Характеристики кросскорреляционных функций R_{EzPm}

№	Схема графиков $R_{EzPm}(t)$ по рис. 2	ρ_{\max}	Частота, f_m , Гц	Период, T , с	Вариант I		Вариант II	
					$\Delta\tau$, с	$\Delta\tau/T$	$\Delta\tau$, с	$\Delta\tau/T$
1		0,38	0,08	12,5	9,25	0,75	3,0	0,24
2		0,63	0,17	6,0	3,3	0,55	0,3	0,05
3		0,54	0,42	2,4	0,35	0,15	1,55	0,65
4		0,6	0,92	1,09	0,1	0,09	0,55	0,5

Примечание. Вариант I: антикорреляция. Смены механизма связи нет.
Вариант II: смена знака корреляции. II_I и II_{II} - корреляция; II_{III} и II_{IV} – антикорреляция.

Можно этот же вопрос сформулировать иначе: в норме ККФ описывает корреляцию или антикорреляцию с разнополярным поведением перьев на двух дорожках. Так с одной стороны, если вертикальный несимметричный диполь – приемник отслеживает на эквивалентной эффективной высоте $h_{эф}$ разность потенциалов, или градиент потенциала относительно поверхности земли, то можно сказать, что регистрируется вертикальная составляющая напряженности электрического поля при исследовании квазиэлектростатических полей. Здесь же напряженность на низких частотах меняется медленно, а регистрируемый сигнал будет нулевым, или запаздывать настолько, что появится эффект антикорреляции. Необходимо проанализировать оба случая, выделенные в таблице 4 в четырех последних столбцах под вариантами I и II, где приводятся абсо-

лутные ($\Delta\tau$) и относительные ($\Delta\tau/T$) интервалы времен задержек сигналов. Именно по этим данным построены графики $\Delta\tau(f_m)/T$ и $\Delta\tau(f_m)$ для предполагаемых вариантов (рис. 28 а, б). Вариант I не дает поводов для раздумий, однозначно описывая быстрое монотонное падение величины задержки сигнала $E_x(t)$ (следствия) от причины $\Delta p_\phi(t)$, поддерживая обратную экспоненциальную связь. По варианту II связь между процессами не однозначная: на низких частотах – прямая, на высоких – обратная. Наилучшим образом смену связи, или направления сопряжения динамик двух процессов на частотной оси можно проследить на рис. 28 б.

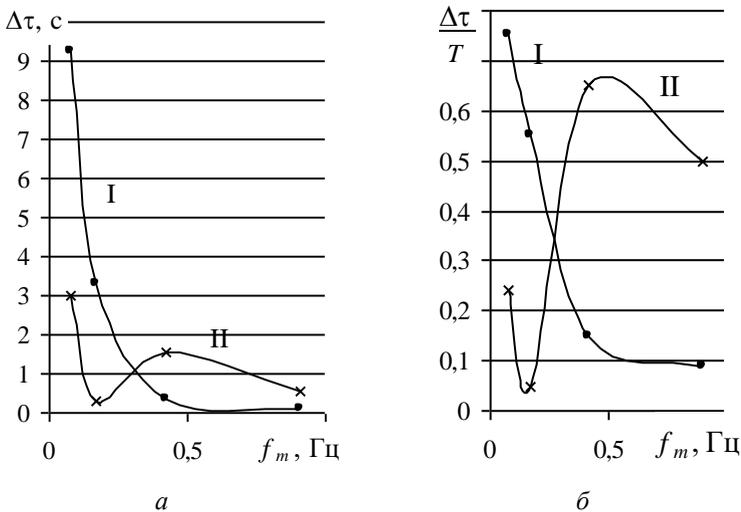


Рис. 28. Абсолютное (а) и относительное (б) запаздывания: • - вариант I; * - вариант II

На рис. 29 приведен сглаженный график распределения на частотной оси максимальных значений $\rho_{\max}(f_m)$ ККФ. Ясно, что частота, на которую приходится максимум графика, отвечает за минимальную временную сдвигку двух реализаций процессов. При той точности, которую ограничивает недостаток данных для графических построений обращает внимание не только схожесть характеров

поведения функций $\Delta p_{\phi}(f)$ и $\Delta\tau(f)/T$, но согласование по местонахождению экстремумов функций $\Delta p_{\phi}(f)$ и $\Delta\tau(f)/T$ (см. рис. 28, 29).

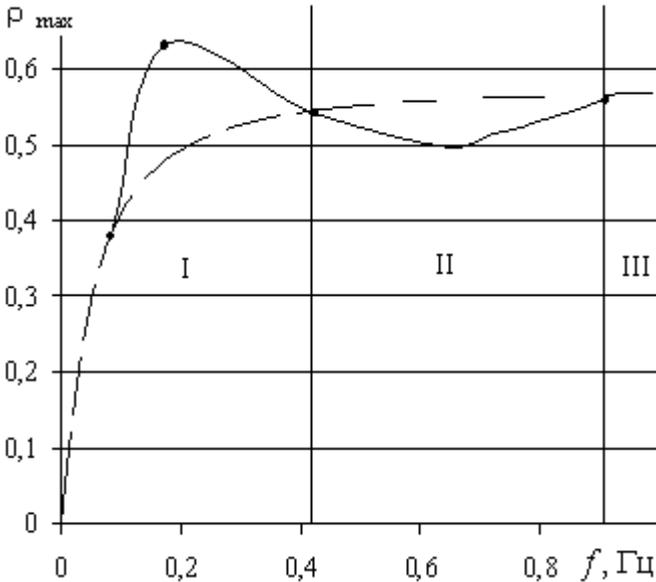


Рис. 29. График сплайн функции $\rho_{\max}(f)$ по четырем опытам (см. табл.): вероятная экстраполяция функции (\cdot); --- - вероятный ход функции $\rho_{\max}(f)$ по варианту I.

Резонно предположить, что график $\rho_{\max}(f_m)$ является зеркальным отображением графиков $\Delta\tau(f)$ и $\Delta\tau(f)/T$ по варианту II, тем самым, косвенно подтверждая справедливость версии сопряжения по варианту II. В таком случае минимальная задержка воспламенения для ТУМV не может превышать 0,3 с, и характерна для частоты $f_m \approx 0,2$ Гц (рис. 28, 29). Режим работы излучателя с частотой $f_m \geq 0,2$ Гц становится граничным, характеризующим появление негаснущей крупнодисперсной топливной фракции в начале каждого периода модуляции и в течение всего промежутка времени работы. Полагаем, что другим эффектом этого режима является максимальная глубина модуляции объема пламени, или максимальная ампли-

туда колебаний эквивалентного радиуса очага на переменном режиме работы ТУМВ, когда процессы воспламенения и формирования топливного облака происходят последовательно в один интервал времени, в течение периода колебаний. Так в опытах 3 и 4 факел пламени не гаснет, а лишь периодически уменьшает объем (см. табл. 4), что указывает на нивелировании эффекта ударной волны от факела поджига к фронту облака.

Смена механизма связи графических реализаций процессов $\Delta p_{\phi}(t)$ и $E_z(t)$ растянуто в интервале $(0,2 \div 0,6)$ Гц частотной оси при практически постоянной $(0,2 \div 0,4, \text{с})$ задержке воспламенения (рис. 28, 29) и означает смену знака излучателя электрического поля: от положительного знака топливного облака, до отрицательного знака пламени. Формирование топливного облака означает смещение, коагуляцию и укрупнение положительно заряженных капелек топлива к периферии с последующим выпадением. На антенне на расстоянии 20 м от поверхности очага индуцируется отрицательный заряд. Последующее воспламенение по результату аналогично деполаризации среды.

В интервале частот $\Delta f_m = 0,2 \div 0,6$ Гц источник генерации электрического поля меняет знак, что приводит к смене механизма сопряжения рассматриваемых графических реализаций физических процессов, определенный эффектом смены знака корреляции [129].

Итак, зафиксируем полученные результаты в более сжатой форме. Анализ кросскорреляционных функций электрических и гидродинамических колебательных процессов выявил следующие закономерности в направлении, увеличения частоты модуляции расхода топлива [110]: 1. Общую тенденцию к росту теснот корреляционной связи; 2. Несинхронность «включения» процессов; 3. Сильную и нелинейную зависимость относительного времени задержки «включения» электрических процессов (относительно реперных гидродинамических) от величины задаваемой частоты модуляции [110]; 4. Смену знака корреляции процессов в интервале частот $0,2 - 0,4$ Гц модуляции тепловой мощности [12, 110].

Последний эффект может объяснить смену механизма связи гидродинамических и электрических процессов, обосновывает переход к поиску независимых макро-источников генерации излучения электрического поля непосредственно в период формирования очага пламени и струи. Механизмы генерации трактуются вертикальным перемещением последовательной совокупности заряженных нагретых термиком с переменной концентрацией сажевых частиц, как развития электрических диполей с меняющимися во времени плечами [114]. Второй механизм генерации локального электрического поля, ранее определенный как ионно-конвекционный генератор на сажевых частицах [114], рассматривается тройным. Первая генерация – характеризуется динамикой потока на активном участке на относительно малых высотах (до 100 м) и определена продольными газодинамическими колебаниями; вторая – характеризуется и продольными колебаниями концентрации малых сажевых носителей некомпенсированного электрического заряда большой подвижности в вертикальной тепловой колонке; третья – определена поперечными «веерными» длинноволновыми колебаниями пассивного участка нагретой струи. Для излучателя E -поля, протяженность обуславливает и мощность, и частоту основной моды [121], поэтому превалирующим по энерговкладу на около-нулевых частотах в суммарный процесс генерации электрического поля был предложен третий механизм.

Объемный способ генерации инфразвуков. Непрерывная нагретая струя метеотрона как акустический излучатель должна иметь широкий СПМ, соответствующий разномасштабным турбулентным течениям [2, 95, 102, 103, 106, 113]. АКФ инфразвукового давления участка 1 рассмотренного выше опыта 31.10.81 характеризуется резким спадом до уровня 0,4 и далее, очень медленным спадом с выраженным характером амплитудной модуляции [110]. Поперечные осцилляции вертикальной нагретой струи высотой ($10^3 - 1,2 \cdot 10^3$) м (см. далее модель МГТ) [3, 57] или пассивного участка струи с одним нижним мягко закрепленным концом, определяет четвертьволновый акустический излучатель протяженностью около

$(1 - 1,2)10^3$ м, что согласуется с расчетной собственной частотой 0,07 – 0,08 Гц. В указанных пределах 0,01 – 100 Гц на частотной шкале следует ожидать формы спектрального распределения акустической плотности мощности, близкой к релеевской с подавляющей плотностью мощности на около-нулевых частотах, слабо выделяющимся пиком на частоте до 0,1 Гц. Оценивая начальный диаметр активного участка струи до 10 м, получаем характерный волновой предел излучения не менее 70 м, или по частоте не более 5 Гц аэродинамического шума [110].

При заданной схеме подачи топлива на форсунки горелок и полной длине топливного тракта 40 – 50 м следует ожидать формирования $\frac{1}{2}$ -длинноволнового генератора автоколебаний на частотах 12 – 15 Гц, а при заданной скорости подачи топлива – характерной частоты излучения около 11 Гц [113]. Причастность характерных максимумов к эффектам факела и пульсациям фронта пламени позволяет предположить возможность генерации акустических волн периодическим изменением объема факела. Так монополюсный характер генерации звука, предложенный теорией Лайтхилла [102, 103] перенесен авторами на весь крупномасштабный объем сплошного пламени по механизму монополюсного типа излучения, задаваемого периодическим изменением расхода топлива. В этом случае средняя мощность акустического излучения в широкой полосе частот падает, а мощность излучения основного тона в диапазоне генерируемого инфразвука резко растет. Этим устраняется основная трудность генерации инфразвука для частот ниже 1 Гц [130].

Для подтверждения возможности монополюсного типа излучения акустической энергии при работе ТУМ для частот до 1 Гц в конструкцию ТУМ был введен программный механизм переменной производительности установки [1]. Давление подачи топлива на форсунках ТУМ менялось по гармоническому закону с частотами 0,08 Гц, 0,17 Гц, 0,42 Гц, 0,5 Гц, 0,91 Гц. Соответственно, подобным образом, как видно, модулировано и звуковое давление (прил. 1). Формы СПМ во всех случаях подобны (см. рис. 18 – 20). Кросскорреляционные функции подтверждают наличие корреляционной свя-

зи рассматриваемых процессов, максимумы плотности спектральной мощности ожидаемо приходятся на частоты модуляций давления подачи топлива [131 – 134]. Мощность излучения – до 150 Вт (расчетная мощность около 130 Вт) на основной частоте модуляции 0,5 Гц (см. далее).

По результатам спектрального анализа цифровых реализаций звукового и инфразвукового давления на стационарном режиме работы ТУМВ на номинальном режиме с надежностью 90 % обнаружена и зарегистрирована устойчивая достоверная генерация направленного акустического поля с шумоподобным спектром и максимальной плотностью мощности $L = 90 \pm 1$ дБ в геоакустическом диапазоне (ниже 0,1 Гц).

Увеличение скорости протяжки бумажной ленты на регистраторе ЭЭГУ 16-02 позволило уменьшить шаг дискретизации записи графических реализаций инфразвукового давления и расширить по верхней границе диапазон спектрального анализа до 20 и 100 Гц даже при ручной обработке (табуляции в эпоху без компьютеров). При этом левая низкочастотная граница спектра сохранилась в результатах на уровне 0,01 – 0,04 Гц. При сопутствующем снижении надежности до 30 % и увеличении разрешения на частотной оси СПМ напряженности электрического поля выделяется преимущественная частота 0,08 Гц с признаком слабого узкополосного сигнала. В полосе частот до 35 Гц в СПМ инфразвука выделяются и иные максимумы на частотах 14 – 16 Гц, 5 – 6 Гц и 11 – 12 Гц. Первые два присутствуют в спектрах всех исследуемых реализаций процессов, а третий – выделяется лишь в 30 % реализаций [113, 129]. Кроме максимума на нулевых частотах с узким пиком на частоте 0,08 Гц в правой части спектра с указанной достоверностью выделен максимум плотности мощности в интервале частот 15 ± 2 Гц, обусловленными длиной основного топливного тракта (50 м) и трактуемой основной частотой автоколебаний в топливной системе ТУМ [1, 110, 113].

Авторы предлагают следующие механизмы генерации акустических колебаний при работе установки метеотрон:

1. Стационарный режим (участки 1 – 3): дипольное излучение нагретой струей (около 0,08 Гц) с мощностью 8 – 10 Вт; автоколебания в протяженной системе подводных трубопроводов (15 ± 2 Гц); генерация и срывы завихрений с потенциального ядра потока продуктов сгорания, соответствующая частоте (5 – 6 Гц).

Акустические исследования подтвердили наличие дипольного излучения с максимумом акустической плотности мощности на частоте 0,08 Гц [136]. Для такого типа излучателя звука геометрический размер (протяженность) обуславливает частоту излучения, а относительная скорость перемещения – мощность, излучаемую на данной частоте. Поэтому мощность получается малой, а частота – инфразвуковой.

Избыточно заряженное пламя работает как маломощный монополь. Даже при малых перемещениях фронта (пульсации с частотой автоколебаний) эффект монопольного излучения сопоставим с эффектами вихреобразований. интенсивность генерации электрических колебаний много меньше интенсивности генерации акустических колебаний нагретой струей [135 – 137].

2. Режим глубокой модуляции (до 100%) на частоте 0,08 Гц. Радиус R эквивалентной сферы очага меняется от $R_{\min} = 0$ (пламя гаснет полностью) до $R_{\max} = 5$ м.

Первая волна (фронт волны) возмущает приземный слой, возбуждая в нем внутренние гравитационные волны (ВГВ), поэтому приемник звукового давления в последующие периоды работает в поле ВГВ. На реализации это видно: 1-е гашение факела – самописец пишет фон, второе гашение – самописец пишет ВГВ. Таким образом, если 1-я модуляция звукового давления была глубокая – до 100 %, то уже вторая – лишь 20% и далее глубина модуляции сохраняется. Монопольное излучение источника происходит в поле ВГВ, им же возбужденным и поддерживаемом.

Отсутствие конвективной колонки меняет спектр вариаций E_z -составляющей на около-нулевых частотах. Функция радиуса эк-

вивалентной сферы $R(t)$ не совпадает с функцией давления подачи топлива $\Delta p_{\phi}(t)$ из-за задержки воспламенения $\Delta\tau_{\text{воспл}} = \Delta\tau_{\text{физ}} + \Delta\tau_{\text{хим}}$.

Уже первые эксперименты по синхронной регистрации интенсивности теплового излучения пламени и переменного давления подачи топлива на форсунки $\Delta p_{\phi}(t)$, показали, что даже функции радиуса (объема) пламени $R(t)$ и $p_{\phi}(t)$ не синхронны по максимуму – сдвинуты одна относительно другой во времени (величина сдвиги зависит от частоты модуляции) и качественно различны

Спонтанные термики не разогреты и не могут подняться на максимальную, характерную для вертикальной непрерывной струи высоту H_{max} . Они зависят «гроздьями» на некоторой значительно меньшей высоте H_m , и сносятся по направлению ветра, образуя с поверхностью Земли локальные поля – «ячейковых» диполей. Данный механизм приводит к появлению сигнала с запаздыванием, но сам сигнал не нарастает с удалением диполей от области приема. Кроме того, линия задержки газодинамической природы приводит к временным участкам в форме биений для суммарного сигнала.

3. При модуляции давления подачи топлива на форсунки $\Delta p_{\phi}(t)$ в диапазоне 0,1 – 0,5 Гц (0,17 Гц, 0,42 Гц, 0,5 Гц) основная мода ВГВ сохраняется, хотя и оказывается менее выраженной. Эти колебания запаздывают по фазе от колебаний, задаваемых монополюсом, поэтому этот случай характеризуется углублением модуляции колебаний звукового давления (до 20%) и наличием биений.

С увеличением частоты модуляции вид функции $\Delta p_{\phi}(t)$ приближается к виду функции, задаваемой задержкой воспламенения, а плечо диполя, организуемого термиками растет, так как влияние его уменьшается, запаздывание по фазе растет, и энергия биений падает. Таким образом, функция суммарного акустического поля в указанном диапазоне приближается к функции $\Delta p_{\phi}(t)$.

4. В диапазоне частот 0,5 – 1 Гц нагретая струя оказывается – четочной, а радиационная колонка – менее выраженной. Пламя гаснуть не успевает (горит нижняя крупная капельная фракция), но и давление в магистрали не успевает подняться до номинального.

а) Влияние основной моды ВГВ еще более уменьшается. Основной механизм – монополюсный с глубиной модуляции до 75 %.

б) Время задержки воспламенения: $\Delta\tau_{\text{хим}}$ (пламя не гаснет) функция $R(t)$ практически совпадает с функцией $\Delta p_{\phi}(t)$. Четочная струя модулирует поле Земли с частотой отрыва каждого последующего термика (четки), как участка струи. Влияние диполя, образованного термиками, слабое и значительно запаздывает по фазе, и энергия биения падает. Полюс диполя колеблется с частотой одной из мод ВГВ, модулируя сигнал излучающей сферы. Корреляция между вариабельностью акустических и электрических полей существенна [110].

5. При модуляции давления подачи топлива в диапазоне Δf 1 – 10 Гц следует ожидать сохранение четочной структуры активного участка струи с постепенным ее нивелированием вдоль струи по пассивному участку. Глубина модуляции объема пламени падает, интенсивность колебаний звукового давления растет. Процесс излучения монополюсный с увеличением энергии на всех частотах этого диапазона. Влияние турбулентности нарастает, но развитое турбулентное движение еще не сформировано ($f_{\text{max}} \cong 5$ Гц). Функции $R(t)$ и $\Delta p_{\phi}(t)$ качественно совпадают, однако энергия вариабельности E -поля, вероятно, будет падать за счет того, что пламя не гаснет и вариации $R(t)$ становятся меньше.

6. СПМ показывают, что гармонический процесс $E(t)$ в частотном интервале 12 – 18 Гц проявится слабо с энергией, сопоставимой с погрешностью расчета [110]. В то же время энергия акустических колебаний на этих частотах – значительна и сравнима на исследованных расстояниях r с энергией ВГВ. Таким образом, метеотрон, как акустический излучатель имеет больший динамический диапазон, нежели как излучатель E -поля.

7. Механизм излучения инфразвука [89], как минимум, двойной [94 – 96, 109]. Расчет периодичности срывов потока на границах пламени с использованием закона Колмогорова – Обухова [110], выделяет верхнюю граничную частоту турбулентности до 5 Гц, что соответствует выделенному на СПМ интервалу частот. Не-

совпадение частот образования заряженных вихрей (~1,5 Гц) и частоты пульсаций на границах пламени ($4 \div 5$ Гц) указывает на их статистическую независимость. Можно предположить наличие, как минимум, двух относительно мощных процессов вихреобразования в области начального сечения нагретой струи. Более высокочастотный ($4 \div 5$ Гц), резонно, расположить в области максимальных скоростей (температур), т.е. над условным ядром пламени и интерпретировать аperiodическими нарушениями потенциальности потока; менее высокочастотный (~1,5 Гц) – в области приграничных течений струи, наиболее насыщенной сажевыми частицами – носителями отрицательного заряда [2, 29].

8. Радиационная вертикальная колонка визуализирована по области температурной рефракции на затемненных фотографиях. Она ограничена конической поверхностью с углом раскрытия 22° , что само по себе весьма неожиданно. Резонно предположить, что этот «нагретый конус» является стоком энергии звуковых колебаний, предопределяя эффект шунтирования высокочастотной части инфразвукового спектра.

Метеотрон как источник коррелированных акустического и электрического полей. Генерации электрических и акустических колебаний в окружающем пространстве при работе метеотрона развиваются во время истечения и диспергирования топлива, его перемешивания с окислителем и продуктами сгорания, горения, формирования тепловой струи в гравитационном и внешнем электромагнитном поле и в исследуемом КНЧ диапазоне [2]. Ранее обнаруженные корреляционные связи между процессом изменения давления подачи топлива на вход форсунок ТУМ с акустическими и с электрическими колебаниями в окружающем пространстве приводит к мысли о существовании прямых или опосредованных, но как минимум статистических связей между вариациями электрического и акустического поля при работе ТУМ. Сравнение СПМ (см. рис. 18 – 20) для этих процессов при работе ТУМV на стационарном (автоколебательном) режиме не дало однозначного ответа о существовании таких связей. Графики СПМ похожи, однако ход кривых гра-

фиков реализаций процессов задается, очевидно, разными превалирующими факторами. Методика сопоставительного спектрального анализа позволила качественно и объективно выделить некоторые названные ранее источники: осциллирующую нагретую струю, пульсирующий в режиме автоколебаний монополь (объем пламени), отрывные приосевые и периферийные течения на факеле пламени и начальной части (0 – 50 м) активного участка. Информации все еще недостаточно ни для выделения основных источников по мощности, ни для оценки их развития, ни для анализа их взаимовлияния (взаимодействия или взаимоисключения и компенсации). В поиске идентификации источников генераций или механизмов сопряжения генерируемых процессов был проведен корреляционный анализ зарегистрированных цифровых реализаций электрических и гидродинамических процессов с попыткой их «сближения», включением в методику синхронные регистрации акустических колебательных процессов в данном диапазоне как эффекты газодинамических процессов в тепловой струе, пламени и окружающем приемный датчик пространстве.

Корреляционный анализ включал в себя обработку реализаций обоих процессов и расчеты коэффициентов парной и ранговой корреляций, кросскорреляционных функций цифровых реализаций процессов, а также анализ времен задержек процессов и зависимости максимальных коэффициентов корреляции от частоты модуляции тепловой мощности на переменном режиме работы ТУМВ. Этот анализ в табличном и графическом форматах и в полной мере приведен в книге 4 [110]. Динамика теснот корреляционных связей электрических и акустических процессов при работе на стационарном режиме показала, что текущие значения коэффициентов не превышают уровня значимости, что указывало на отсутствие единых мощных источников генерации электрических и акустических в исследуемом диапазоне частот. Но сравнительный спектральный анализ указывал на немалую долю выделения мощности по обоим процессам в узком интервале частот около 0,08 Гц [1, 2]. Да и визуально при осмотре отдельных участков лент записей (см. рис. 23)

было видно, что при выключении метеотрона (пламя гаснет за десятые доли секунды) уровень напряженности локального электрического поля и уровень звукового давления спадают до фоновых за одинаковый интервал 12,5 с времени. Этот интервал соответствует частоте 0,08 Гц, что позволяет утвердить нагретую струю единым источником излучения. Таким образом, корреляционный анализ при уровне значимости $\alpha = 0,02$, не позволяет достоверно утверждать наличие тесной статистической связи между этими процессами. Но с указанной малой вероятностью, за счет малого вклада в энергетический спектр на данной частоте со стороны процесса вариаций уровней звукового давления, можно утвердить сопряжение между указанными процессами на стационарном режиме работы в очень узком интервале частот около 0,08 Гц.

При переходе от собственных колебательных процессов в пламени и струе к вынужденным, причинно-следственную систему сопряжений вариабельности полей следует ожидать принципиально иной – с определяющими и управляющими (задающими) внешними факторами. При многофакторном влиянии желательно отделить один или несколько факторов и рассмотреть их отдельно. В рамках этого утверждения с отделением фактора влияния со стороны нагретой струи и была проделана серия экспериментов по синхронной регистрации обоих процессов при работе ТУМV на переменном режиме – режиме модуляций давления подачи топлива на форсуночные горелки ТУМV, задаваемых программным механизмом. На этом режиме вместо сплошной нагретой струи и вертикальной тепловой колонки, достигающей в отсутствие ветрового сдвига слоя инверсии, с тем или иным эффектом появляются нагретые пузыри (термики), массовые и немассовые, соответственно.

Переменный режим производительности метеотрона ранее был применен на модификации ТУМ III при исследовании вихреобразования в свободной атмосфере, генерации и формирований пламенных шароидов в сопоставлении их с плазменными шароидами [1, 2]. В применении его на модификации ТУМV, как это уже заявлено, преследовалась иная цель – создание монополюсного механиз-

ма генерации акустического и электрического полей. В этой части скорость изменения объема пламени ограничена временем задержки воспламенения и временем задержки гашения факелов пламени. Поэтому необходимо было провести оценочный анализ динамики объема пламени при работе насосов высокого давления в режиме заданной частоты модуляции производительности и в рамках исследуемого диапазона частот 0,1 – 100 Гц.

В первых опытах управление дроссельного типа с одновременным перекрыванием расхода топлива на обоих насосах высокого давления было ручным. Лишь после того, как авторы убедились в технологической эффективности и научной перспективности переменного режима работы ТУМВ в топливную магистраль был поставлен золотниковый механизм с внешней регуляцией частоты [1].

На частотах модуляции 0,08 Гц, 0,17 Гц и 0,92 Гц коэффициенты парной корреляции составляли 0,354, 0,265 и 0,569 соответственно, при уровне значимости 0,02, объясняя факты не обнаружения корреляционной связи переменным, зависимым от частоты модуляции, временем задержки акустического и электрического процесса перед гидродинамическим. Кросскорреляционный анализ не только подтвердил сопряжение процессов, но и обнаружил нелинейное упрочнение ее тесноты с ростом частоты модуляции. Кроме сложного и нелинейного сопряжения акустических и электрических процессов при работе метеотрона, обнаружена смена знака корреляции. Для процесса генерации акустических колебаний эффекту смены знака корреляции процессов предшествует смена превалирующего механизма излучения: от дипольного – струей, к монополю – пульсирующей сферой. Для процесса генерации электрических колебаний это означает переход от механизма генерации диполем – струей к диполю: очаг пламени – мнимый очаг, или от механизма генерации непрерывным источником к генерации дискретным источником [109]. Характерными частотами смен механизмов генераций являются: для электрических колебаний – 0,25 Гц, для акустических – 0,33 Гц [113]. Доказательные расчеты приведены в книге 4 [110].

Влияние разномасштабных вихревых и потенциальных течений на условия генерации и приема. Проведем анализ возможных механизмов статистической взаимосвязи процессов формирования E_z -составляющей электрического поля и уровней звукового давления акустического поля при работе ТУМВ в режимах разномасштабных вихревых течений. Следует принять, что проводится поиск как функциональных (детерминированных) связей, так и статистических, поэтому если факторы синхронного влияния по своей природе могут быть случайными, то только групповые (пространственно-распределенные (и) или временные) эффекты обеспечат рассматриваемую связь. На стационарном режиме это могут быть срывы вихрей тангенциально с поверхности стационарного факела пламени (рис. 30), а также интенсивное истечение из распределенных групп форсуночных отверстий полуоткрытой условной топливной полости. Исследуемые масштабы структурных течений предполагают к рассмотрению соответствующий диапазон крайне низких и инфразвуковых частот.

Однако, даже в первом случае ни тангенциальные срывы потока, ни поверхность стационарного факела пламени не являются таковыми. С одной стороны и в первом случае принимаемый поверхностью поток воздуха, поглощается факелом объемно в каждой точке. Срывается же поток продуктов сгорания – нагретый разрывной поток с вертикальным импульсом, обеспеченным архимедовым ускорением. С другой стороны и во втором случае поверхность, составленная из головок форсуночных факелов можно принять условно сплошной, но стационарной – невозможно.

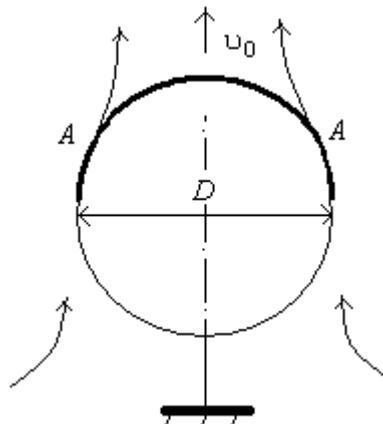


Рис. 30. Цилиндрическое тело (вид сзади), обтекаемое воздухом с горизонта: A – тангенциальные срывы потока

Это «живая» поверхность. Однако ее поверхностные изменения (пульсации) достаточно малы для отнесенных областей приема сигналов, и в условиях регистрации, принимаем поверхность, как неизменную со средними геометрическими параметрами (рис. 30).

Установившийся режим механизма срыва вихрей положительной плавучести обеспечивает системное самоподобие процессов их генераций [136 – 140]. Известно, что числовым критерием газодинамического подобия для твердого тела в форме цилиндра диаметром D в ортогональном потоке воздуха, текущего со скоростью v_r с горизонта служит число Шервуда $Sh = \frac{D}{vT} \approx 0,21$. Значения

скорости v_r сначала (при формировании сплошного объема пламени) сильно расходятся. В частности, «роза ветров» обеспечивает значительное «преимущество» по расходу воздуха. Однако, и при начальной малоактивной ветровой обстановке ($v_r < 1$ м/с) вокруг пламени устанавливается устойчивое циркуляционное движение, имеющее системный характер, так как суммарный и радиально равномерный расход воздуха в пламя подстраивается сообразно стехиометрическому коэффициенту (не менее 15), а значит, и давлению подачи топлива на форсунки. Иными словами, при полном сгорании топлива расходом 9 кг/с расход воздуха в объем пламени не должен быть менее 135 кг/с. С учетом вовлеченного воздуха в вертикальную струю с принятым коэффициентом вовлечения 0,08 [138], радиальный расход с горизонта составит около 160 кг/с. Если приход массы с горизонта соответствует уходу массы в вертикальную струю, то такой расход соответствует средней по начальному сечению струи скорости около 10 м/с при расчетной плотности продуктов сгорания (прил. 7 книга 1 [1]) и радиусе 6 м начального сечения. Если осевая максимальная скорость $v_0 \approx 30$ м/с, то полученная величина скорости принимается при оценке за скорость срыва $v_A = 10$ м/с на эквивалентном радиусе $R_0 = 6$ м начального сечения струи и не противоречит наблюдаемой визуально.

Параметром газодинамической гомохронности является частота $\nu = 1/T$ срывов вихрей с выделенной части поверхности (см.

рис. 30). Эти вихри составляют периферию центрального вертикального потока нагретых газов и выполняют указанную выше функцию вовлечения натекающего воздуха в нагретую струю. Вертикальная нагретая струя обретает присоединенную массу, вообще говоря, неодинаково распределенную по боковой поверхности.

В области приема существуют самые разнообразные масштабные источники вихреобразования, например: кирпичные строения, элементы рельефа, деревья и т.п. Так, приемник инфразвукового давления размещен на расстоянии 40 м от горелок метеотрона в кирпичном доме в одних опытах или вынесен рядом с домом, в других. Тогда становится существенной оценка взаимодействия циркуляционного потока $v_r = 0,5 \div 1$ м/с с контурными поверхностями дома размером $D = 10$ м. Период срывов воздуха $T \approx (50 - 100)$ с, и, соответственно, частота: $f = (1 - 2) \cdot 10^{-2}$ Гц, характеризующая верхнюю границу геоакустического диапазона спектра внутренних гравитационных волн. С одной стороны этот диапазон частот выведен за рамки приема приемника инфразвука. АЧХ приемника имеет нижнюю предельную частоту реакции 0,03 Гц [1]. С другой стороны любые стационарные препятствия в циркуляционной зоне около метеотрона вносят возмущения (срывные течения) в циркуляционный поток, поглощаемый далее объемом пламени метеотрона. Указанные длинноволновые ритмические возмущения усваиваются факелом пламени и вертикальной нагретой струей. Они могут влиять и на процессы горения, и на распределение ионов и сажевых частиц в реакционных зонах форсуночных факелов, и на область догорания, и на форму и состав активного участка вертикальной струи. Такие влияния приносят слабый мультипликативный характер воздействия, как на формирование локального квазиэлектростатического поля, так и на характер вариаций напряженности E -составляющей электромагнитного поля Земли.

За неимением лучшего применим формулу Шервуда к срывам вихрей с поверхности А-А (см. рис. 30), понимая эти срывы продукцией косвенного взаимодействия набегающего потока и поверхности сплошного факела пламени. В нашем случае вместо твердого

тела – составной сплошной факел пламени цилиндрической формы характеризуется величинами $v_0 \approx 30$ м/с, то $v_A = 10$ м/с. При диаметре цилиндра $D_{A-A} = 12$ м, получаем $T = 6$ с и $f = 0,17$ Гц.

Второй предлагаемый механизм возбуждения вариаций электрического и акустического поля, связанный с истечением топлива из форсунок со средней скоростью $v_\phi = 170$ м/с [1]. По теории Колмогорова-Обухова [139] для таких турбулентных течений динамический диапазон частот растет пропорционально числу Рейнольдса в степени $3/4$, и верхняя граница определяется из соотношения: $\frac{1}{T} \propto \frac{v}{D} Re^{3/4}$. Как видим, частота может быть определена с точностью до некоторого коэффициента пропорциональности, что позволяет лишь сопоставление частот системных турбулентных течений. Так применяя указанную формулу как расчетную для вышеприведенного примера с домом, получаем, что коэффициент пропорциональности равен 0,1. Десятикратное различие при оценке турбулентных течений не является ни самоочевидным, ни удивительным. Более того, этот коэффициент будет менять значения в зависимости от объекта исследования, например: факел пламени или холодный воздух. При оценке по этой формуле и учетом коэффициента 0,1 частот излучения форсуночными пламенами с $v_\phi = 170$ м/с, длиной факела $D = 2$ м и вязкостью 10^{-5} Па·с [19], основная частота излучения приходится на 4 МГц. Но авторы с одной стороны не наблюдали и не слышали формирования таких высоких частот в диапазоне ультразвуковых при зажигании топливного облака и формировании форсуночных пламен, а с другой – указанный диапазон частот находится вне рамок цели исследования.

Итак, формула Колмогорова – Обухова мало отличается как по форме записи, так и по достоверности результатов от формулы критерия Шервуда, однако она позволяет более осмысленно подходить к разным режимам течения, начиная от ламинарного. Для ламинарных течений величина Re мала, скорости малы, поэтому для макрообъектов получаются значения T чрезвычайно большие. Однако, слоистые течения вообще не имеют устойчивых собственных

волнообразных или циркуляционных форм, а потому принципиально не могут быть «родителями» – источниками генераций процессов частотного ряда. А вот в пламени значения Re сравнительно быстро растут до критических значений даже при очень малых скоростях течения плазмы пламени и благодаря ничтожно малым значениям коэффициента динамической вязкости.

Прагматизм практического наблюдения за ходом экспериментов позволяет провести смысловую экспертную оценку частотных спектров. Очевидное и первое физиологическое ощущение – «закладывание ушей» при работе метеотрона. «Эффект взлета самолета», но более отчетливый, т.к. разговорная речь на расстоянии 1 м не слышна. Около-нулевые частоты СПМ звукового давления сильно энергетически выражены. Генератор таких частот должен иметь сопоставимые с полудлиной волны размеры. Этому требованию отвечают как массивная нагретая струя продуктов сгорания, так безмассовая тепловая колонка. Инфразвуковой диапазон спектра (1 – 20 Гц) должен быть широкополосным, отвечающим развитой и разномасштабной турбулентности в пламени, струе и окружающей среде.

Характер СПМ E_z -составляющей задается напрямую как масштабом турбулентности, определяющим размеры областей с некомпенсированным зарядом, так и мультипликативным воздействием факела пламени на трассу распространения электрического сигнала. В первом случае и задавая по аналогии с электрическое число Рейнольдса: $Re = vD \left(b_i \frac{kT}{|e|} \right)$ можно ожидать корреляций вари-

аций параметров акустического и электрического полей от одного источника при равенстве механического и электрического чисел Рейнольдса. Ожидать такого совпадения нет никакого резона. Вероятно, именно поэтому корреляция вариаций полей в инфразвуковом диапазоне практически отсутствует. Единственный вариант сближения этих чисел может быть представлен случаем «вмороженности» электрически заряженных частиц в механический термодинамический поток. Тогда заряженные частицы обязаны перемещаться

на транспорте (пыль, вода, сажа, радикалы и т.п.) и, будучи малоподвижными, представлять конвекционный ток.

В указанном смысле нагретая струя, как излучатель инфразвука и E -поля является и непрерывным, и дискретным источником. Как дискретный механизм излучения инфразвук генерируется при срыве вихревых термиков [2], но практически не генерируется при их перемещении; а дискретный излучатель E -поля формирует сигналы при отрыве и перемещении электрически заряженных термиков [109, 136, 137]. Каждый такой вихрь генерирует E -поле, с возрастающим вверх по вертикали геометрическим размером, уменьшающейся объемной плотностью отрицательного некомпенсированного заряда и падающей скоростью перемещения. На частоте модуляции давления подачи топлива 0,5 Гц вертикальная эталонная антенна [1] различает 2 – 3 термика в нагретой струе.

Казалось бы, следовало ожидать тесной корреляции процессов монополюсного излучения инфразвука и дипольного излучения E – поля с учетом процессов вихреобразования и эффектов тепловой струи [141]. Однако, спектральный анализ электрических процессов генерируемых на стационарном режиме, показывал, что частота 0,5 Гц является нижней граничной частотой интервала 0,5 – 1,5 Гц на который приходится значительная доля энерговыделения. Поэтому данный источник генерации предлагается трактовать как «очаг – спонтанный термик» с характерной частотой «аккумуляции и срыва» около 1 Гц. Этот вывод косвенно подтверждается максимальным временем задержки сигнала $E(\tau)$ от $p_m(\tau)$, приходящимся на 0,5 Гц. Вероятно, интервал времени 2 – 2,2 с оптимален для включения процесса аккумуляции и «срыва» мощного спонтанного термика [1, 2, 81, 103, 142] внутри механизма вертикальных апериодических пульсаций (см. с. 67).

Результаты регистрации под землей и под водой. С одной стороны, и как показано выше, потенциальные и вихревые течения воздуха в формах радиальной и циркуляционной составляющих в пограничном слое атмосферы сопровождают работу метеотрона. С другой стороны можно заметить все приемные антенны выше обозначенных экспериментов по регистрации вариаций напряженности электрического поля, генерируемых при работе ТУМ, находились на эффективной высоте 1 – 2 м от поверхности земли [1]. Для нивелирования влияний искусственных и естественных факторов и эффектов пограничного слоя атмосферы на механизм генерации электрического поля при работе ТУМV использовались приемные антенны подземного и подводного расположения. В октябре 1984 года был проведен эксперимент по синхронной регистрации наземным, подземным и подводным приемными каналами, обозначенными ранее в книге 1 под номерами: 14, 13 и 9 с близкими частотными характеристиками [1]. Эксперимент проводился в пасмурную погоду при низкой облачности без дождя. Регистрации проводились самописцем НЗ38-4 в системе единого времени [1] до работы метеотрона с записью вариаций унитарной компоненты напряженности электрического поля Земли (помехи) и во время работы метеотрона. На рис. 31 *а* в качестве примера показан характерный участок записи электрического сигнала при работе ТУМV с регистрацией наземным (верх) и подземным (низ) приемными каналами 14 и 13 [1, 144]. Метеотрон работал на стационарном режиме, а затем в режиме модуляции давления подачи топлива на форсунки с частотой 0,5 Гц и глубиной до 80 % по объему факела (рис. 31 *а*).

Максимумы на СПМ помехи приходятся на около-нулевые частоты (рис. 31 *б*), при работе метеотрона на постоянном режиме с течением времени формируется основная частота 0,08 Гц; в режиме модуляции выделяется частота модуляции 0,5 Гц (рис. 31 *в, г*).

При анализе характеристик измерительных каналов 9, 12 и 14 оказалось, что для диапазонов частот выше 0,08 Гц спектральные уровни по наземному, подземному и подводному каналу соотносятся как 10:1:0,7, соответственно.

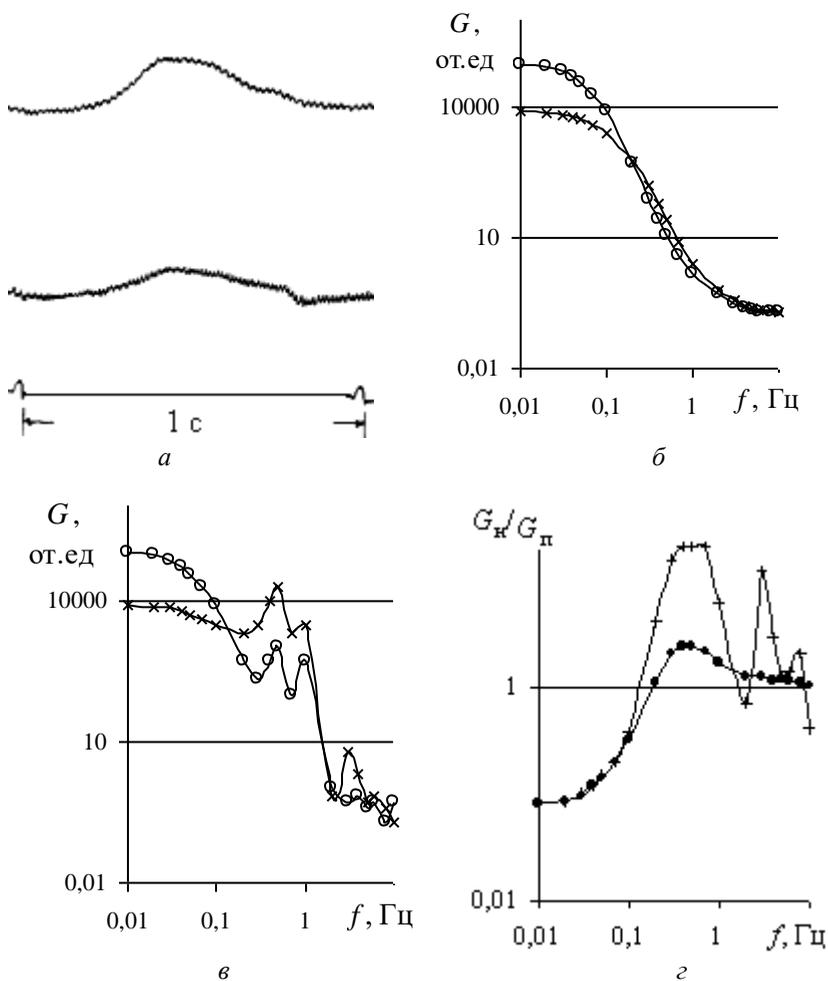


Рис. 31. Компьютерная версия участка записи E_z -составляющей электрического поля при работе ТУМВ в режиме модуляции (а); СПМ в относительных единицах (от.ед.) цифровых записей вариаций E_z -составляющей напряженности электрического поля до - (б) и во время работы метеортона на переменном режиме (е) по наземному (х) и подземному (о) каналам; сопоставительный спектральный анализ цифровых записей наземной и подземной регистрации до - (•) и во время работы (+) ТУМВ (з)

Применение подземных и подводных антенн, защищенных от воздействия внешних факторов фильтрующими свойствами естественных сред (грунта, воды), позволяет и качественно выделять генерируемый сигнал (рис. 31 з), и расширить диапазон приема с эффектом смещением максимума усиления канала в низкочастотный диапазон [143, 144].

Измерения наземной антенной эффективны в пределах АЧХ, т.е. для используемых приемных каналов измерения эффективны, начиная с (0,05 – 0,3) Гц и выше – до (20 – 300) Гц. Все, что ниже по частотной оси – относится к естественным геофизическим вариациям, задаваемым приземным слоем атмосферы. В этой части частотного диапазона сигнал «поглощается» естественным квазиэлектростатическим полем Земли и «гасится» длинноволновой фоновой помехой. Под «поглощением» авторы понимают встраивание сигнала в нормальный закон распределения малых отклонений (флуктуаций), а под примененным термином «гасится» - мультипликативное взаимодействие. Но кроме этого существуют уже известные и ранее упомянутые ограничения к регистрации и акустических и электрических полей, а также малоизвестные. К первым относится газодинамическая структура струи, которая эволюционирует во времени, предопределяя характерные изменения скорости «локального ветра». Такое сопряжение носит инерционный характер: на уровне 10 м от поверхности земли, на расстоянии 50 м от центра установки заметные изменения вектора скорости ветра начинаются через 0,5 мин после ее включения. Вектор скорости приобретает выраженную стационарную составляющую, направленную против часовой стрелки и с небольшими (до 10 %) флуктуациями. Но по истечении 15 – 20 мин работы ТУМВ вектор скорости начинает хаотически вращаться с резким увеличением среднего модуля скорости. Этот момент времени можно зафиксировать и по «разрыву» сплошного факела пламени выделением отдельных форсуночных факелов [2]. В таком случае наземная антенна попадает на первые 10 – 15 минут под слабое радиальное течение воздуха с дальних горизонтов, во вторые 5 – 10 минут – под заметное по величине ско-

рости циркуляционное (тангенциальное) течение вокруг установки, и, далее, под порывистое течение в области приема сигнала. Если приемник инфразвукового давления [145] вынесен за пределы помещения на улицу, то столь необычно заданная во времени газовая динамика в области приема сильно скажется на качестве записи акустического давления [110].

Ко вторым ограничениям отнесем следующее: качество записи вариабельности напряженности электрического поля сильно зависит от ориентации антенны относительно земли и объекта исследования. Иными словами, оказывается «не все равно» - горизонтальный или вертикальный приемный диполь использовать при регистрации. В этой части исследования теоретический анализ [17] выявил следующие основные закономерности: 1. Функции скоростей изменения горизонтальной dE_x/dt и вертикальной dE_z/dt составляющих генерируемого электрического поля сильно отличаются, при этом если dE_x/dt меняет знак на определенной высоте местонахождения термика, то dE_z/dt – сохраняет свой знак на всем пути движения термика; 2. Функция отношений этих скоростей позволяет на основе выбора диаграммы направленности приемной антенны и ее местоположения определить местоположение характерного сечения нагретой струи, где вектор вертикального ускорения частиц меняет направление. В этой части следует вывод о необходимости использования двух типов антенн: горизонтального и вертикального диполей для эффективности анализа электрогазодинамических процессов. При этом первый наиболее эффективен при регистрации процессов формирования и срыва термиков, а второй – при исследовании динамики их перемещения вверх по вертикали.

В качестве третьего ограничения следует просто предупредить, что акустические и электрические генерации происходят в резонаторе «поверхность земли – атмосферный слой». Если акустические резонансные частоты значительно меньше рассматриваемых (вблизи 0,1 Гц) и приходятся на геоакустический диапазон нулевых частот, то электрические – выше и приходятся на частоты регистрируемых шумановских резонансов: 2 Гц; 8 Гц, 16 Гц.

Также напомним, что протяженность массового излучателя с распределенным по длине электрическим зарядом пропорциональна его инерционным проявлениям. Время спада амплитуд колебания регистрируемых параметров до уровня амплитуд сопутствующих эффектов, приблизительно равно периоду колебания на основной частоте $\sim 0,08$ Гц осциллирующей электрически заряженной струи ($\sim 12,5$ с) [11, 110, 113].

Для проведения опытов на комплексе «Атмосфера» по эффективному стимулированию развития облаков к установке метеотрон были добавлены системы забора, подачи и распыления воды с регулируемым расходом в пределах до 100 кг/с [1, 146, 147]. С газодинамическими пульсациями в струях могут быть связаны вариации электрического поля. Введение в струю метеотрона паровоздушной смеси добавило транспортов, а при «угадывании» знака заряда пароводяной смеси могло увеличить вариабельность локального электрического поля при работе комплекса [13].

В опыте 21.09.1982 [110] регистрация вариаций напряженности электрического поля в КНЧ диапазоне осуществлялась несколькими независимыми приемниками, антенны которых располагались на расстояниях $30 \div 140$ м от центра установки [1, 67, 144, 148]. Сигналы с выходов приемников поступали на вход усилителей многоканального самописца УСЧ8-03 и синхронно регистрировались. Запись производилась непрерывно: до включения установки, во время работы метеотрона при подаче в струю пароводяного тумана и после прекращения подачи тумана. По результатам регистрации рассчитаны спектры плотности мощности вариаций напряженности электрического поля (прил. 3, рис. 1П3). В общем тексте приведем один из них на рис. 32. По оси абсцисс отложена частота f Гц, а по оси ординат – логарифм спектральной плотности мощности ($\lg G$). Видно, что наличие в струе пароводяных капель и сажевых частиц приводит к общему увеличению энергии электрического поля. Так, на частоте 0,1 Гц спектральная плотность мощности при наличии струи, содержащей капли воды, примерно на порядок превышает спектральную плотность мощности естественных вариаций.

Прекращение подачи воды в струю метеотрона приводит к резкому уменьшению общей спектральной мощности.

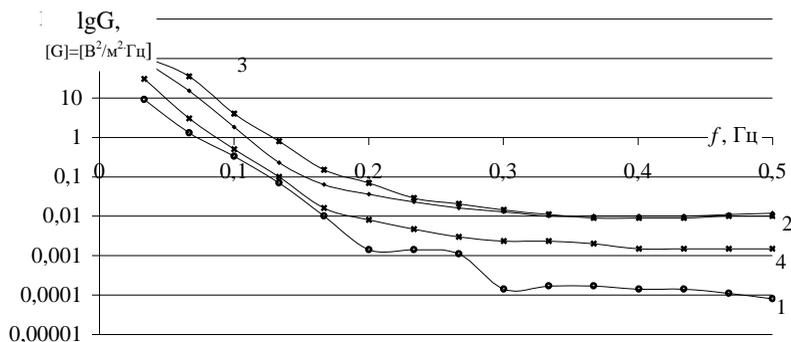


Рис. 32. Спектры плотности мощности вариаций напряженности электрического поля, регистрируемого на расстоянии 50 м от центра метеотрона: 1 – до включения установки, 2 – во время работы установки при подаче воды в струю (4-я минута от начала работы); 3 – во время работы установки при подаче в струю воды (25-я минута от начала работы); 4 – во время работы тепловой установки после прекращения подачи воды. Канал «трапедия» с входным блоком - электрометром ЭД-05М [1, 67, 148]

Введение пароводяного тумана в струю метеотрона даже в уменьшенном количестве до 40 кг в секунду приводит к резкому увеличению водности и концентрации мелкодисперсной сажи в нагретой восходящей струе, что сопровождается увеличением общей напряженности локального электрического поля, усилением вариаций напряженности в диапазоне частот 0,05 ÷ 0,5 Гц. Но в таком случае и высокая влажность в струе будет способствовать интенсивной утечке зарядов по вертикали. Отрицательно заряженные мелкие капли пароводяной смеси, вовлекаясь в струю, подхватываются восходящим потоком нагретых продуктов сгорания; более крупные капли оказываются на периферии потока и выпадают на поверхность земли.

Конечно, при разных методиках проведения и разных решаемых задачах сравнение результатов двух последних опытов каза-

лось бы нелепо. Однако, и это может оказаться весьма полезным действием, т.к. антенна приемного канала [111] в обоих случаях располагалась одинаково – на расстоянии 25 – 30 м от кромки пламени. Первое, что «бросается в глаза» – это отсутствие максимумов на всех четырех спектральных кривых по рис. 32. Если максимум на кривой 1 отсутствует для еще несформированной нагретой сухой струи, а на кривых 2, 3 – более «тяжелая» и инерционная струя, очевидно, имеет максимум сдвинутым влево к диапазону более низких частот, в котором используемое приборное оборудование не может быть использовано [144]. Это конечно не означает, что насыщенная водой нагретая струя поднимается выше «сухой» струи, становится дальнобойнее и обретает собственный больший период поперечных колебаний аналогично струне с одним мягко закрепленным концом. Вероятнее всего, нагретая влажная струя приобретает столь большую массовую инерционность, что ее «раскачать» не представляется возможным. Она не имеет выраженных поперечных колебаний, или, точнее, она пульсирует иначе – как нагретый влажный термик, вытянутый пузырь.

Известно [149], что экспериментальные автокорреляционные функции пульсаций продольной горизонтальной компоненты скорости ветра в атмосфере для малых высот имеют экспоненциальный или экспоненциально-колебательный характер, поэтому функции СПМ должны описываться степенным знаком и быть линейными в логарифмических координатах. Очевидно, пульсации скорости ветра на высотах складываются из турбулентных пульсаций и периодических колебаний. Величины вертикальной и продольной компонент пульсационной скорости зависят от высоты над поверхностью земли и от термической и ветровой стратификации атмосферы. Экспериментальные исследования спектральных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра до высоты 1000 м хорошо согласуются со спектральным законом «минус пять третей». На больших высотах тангенс угла наклона спектра, построенного в ло-

гарифмических координатах для масштабов возмущений, превышающих 100 – 200 м, больше $5/3$ [149, 150].

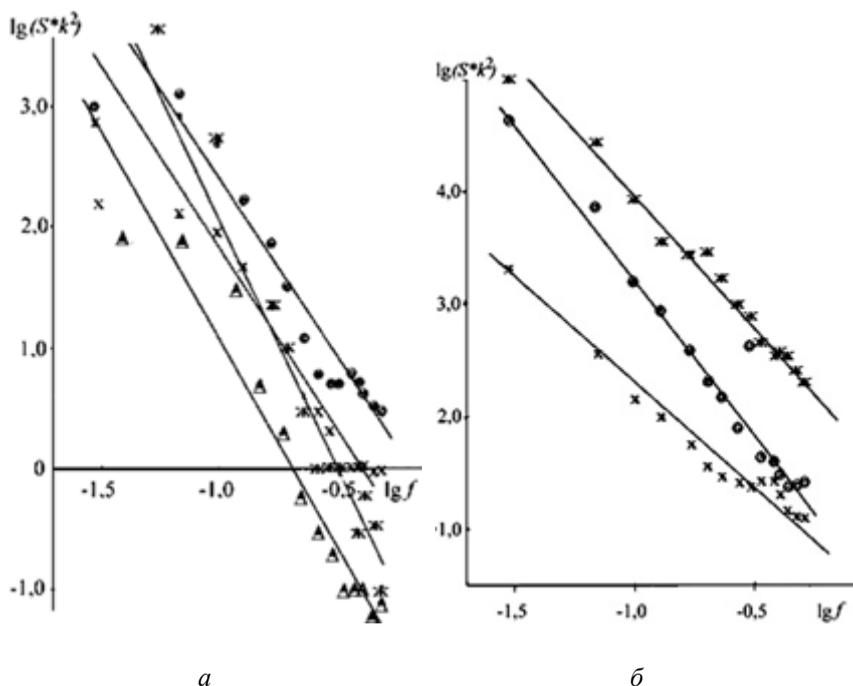


Рис. 33. СПМ вариаций напряженности электрического поля: *а* – приемный канал «пирамида», *б* – приемный канал «мачта» в обозначениях участков записи: *х* – помеха (до зажигания пламени), *о* – в пламя подали пароводяную смесь, *ж* – «влажная» струя метеотрона, Δ – после выключения ТРД

Авторами были проведены эксперименты по регистрации вариаций электрического поля вблизи струи метеотрона и рассчитаны спектры этих вариаций не только по приемному каналу «трапедия» но и по двум другим приемным каналам: «пирамида» и «мачта» (рис. 33 *а*, *б*). Расчетные значения тангенса углов наклона (показатель степени закона распределения) прямых к оси абсцисс для соответствующих режимов работы представлены в табл. 5.

Таблица 5. Расчетные значения тангенса углов наклона (по рис. 33)

Режим работы	до за- жигания	пламя с водой	пламя с водой перед отключением	только пламя
Приемный канал	$\operatorname{tg}\alpha$			
Канал «пирамида» [150] (рис. 33 а)	-2,98	-2,92	-4,11	-3,42
Канал «мачта» [150] (рис. 33б)	-1,90	-2,77	-2,38	-

Пульсации объемного заряда в атмосфере, пропорциональные пульсациям скорости ветра, вызывают пульсации индуцированного заряда на антенне канала. Поскольку ток с антенны на землю представляет собой первую производную заряда, индуцированного на антенне, то показатель степени в законе распределения пульсаций тока на единицу меньше, чем в законе распределения пульсаций скорости. Из таблицы видно, что показатель степени оказался близким к $-7/3$, т.е. показатель степени пульсаций скорости близок к $-5/3$, что характерно для масштабов турбулентности от сотни до десятков метров [149, 150].

Все приведенные выше результаты анализа данных показывают, что при большом количестве полезной информации не получено главное – естественное разделение электрических зарядов в нагретой или холодной скоростной струе, насыщенной носителями малой подвижности (каплями пара, сажевыми частицами и т.п.) не приводит к сколь либо значительной электрической зарядке самой нагретой струи. Эти результаты очень далеки от естественной организации стримеров – проводящих «сухих» каналов и скорее напоминают опыты Франклина с воздушным змеем. Влажную струю следует зарядить! Если не получается естественным способом, то необходимо найти принудительные варианты электризации струи.

II. Опытное моделирование увлажнения и зарядки струи

II.1. Характерные условия пограничного слоя атмосферы при стимулировании образования тумана

Некоторые характеристики приземного аэрозоля. При нагревании капельных жидкостей с поверхности капль испаряются нейтральные (малые) молекулы, так как ионы образуют молекулярные комплексы с массами, значительно превышающими массы нейтральной молекул, и резко уменьшающейся вероятностью испарения. В таком случае электрический заряд капли q без взаимодействия с иными каплями можно считать постоянным вплоть до последней стадии испарения. Полагая, что указанное электрическое структурирование молекул в комплексы приводит к стягиванию собственным электрическим полем глобулы и росту диэлектрической проницаемости ϵ капли с пропорциональным уменьшением ее радиуса r , получаем, что при испарении изолированной капли электрический потенциал $\varphi = q/(\epsilon\epsilon_0 r)$ может не меняться. В этой части отметим, что часто используемое для капельных туманов электрическое отношение $k_1 = q/r$ [151] при формировании туманов может быть и не постоянным. Оно должно следовать эволюции туманов и в рамках принятой логики должно вести себя обратно пропорционально величине ϵ : при испарении – расти, при коагуляции капль даже одного знака – падать. Обязано оно падать и при росте концентрации примеси в объеме капли. Ясно, что с одной стороны величина k_1 обязана иметь трендовый рост с увеличением высоты измерений в туманах и облаках, что, и подтверждается многочисленными работами авторов [151 – 155]. С другой стороны, малые флуктуации около среднего значения k_1 могут свидетельствовать о постоянстве диэлектрической проницаемости ϵ каждой капли и аэрозольного объекта в целом, т.е. системность объекта по указанному признаку, определяемую его исполнением в микро- и макрообъемах. Детальность и цельность устойчивой электрической структуры открытой аэрозольной системы (тумана) может быть за-

дано лишь в относительно узких рамках возможной ее внутренней регуляции спектра дисперсности при динамическом балансе малых внешних и внутренних реакционных влияний и при постоянном электрическом поле.

В указанных условиях по вертикали аэрозоль должен рассматриваться как непрерывно протекающий процесс с переменчивым динамическим равновесием [156]. Снизу – вверх и сверху – вниз акцентированы разные процессы, а значит и механизмы формирования атмосферного аэрозоля. Снизу – грубодисперсный пылевой аэрозоль и водные кластеры, с превалированием процессов испарения и тепло- и массообмена. Сверху – представлен собственно непрерывный процесс аэрозоля от рождения кластеров в газовой атмосфере с представительством от микро- и субмикродисперсионной до грубодисперсной фракции. Здесь превалируют фотолитические и фотохимические процессы. Разное направление формирования аэрозоля по вертикали, узкий и широкий спектры полидисперсности снизу и сверху, соответственно, предопределяют формирование реальной границы спектрального раздела, или разных форм аэрозоля [120]. На границе раздела двух фаз предполагается электрическая поляризационная связь со скачком градиента потенциала по ширине границы [2, 152]. В городских условиях этот переход, вероятно, менее четко выражен (толще) и должен находиться значительно выше от поверхности земли. Вне городских условий распределенный фазовый переход непрерывно в течение суток и сезонов реорганизует форму «рваного электрического покрывала» [17] со свойствами электрического синцития переменного уровня (в пределах высот $\sim 0,4 - 2$ м) и, вероятно, небольшой средней толщины (до 10 см) [2]. Электрическая активность и распределенная по рельефу ветвистость повышенной электропроводимости предопределяет как минимум одно разграничение качества полидисперсных систем в пограничном слое атмосферы [157], что во многом объясняется естественным распределением по вертикали полярных и неполярных молекул. Рост концентрации полярных молекул в направлении «сверху – вниз» формирует рост поляризованности по

механизму ориентационной поляризации во внешнем электрическом поле Земли. Укрупнение частиц и «слипание» с электрически заряженными капельками воды приводит к развитию необходимости организации фазового перехода на определенном расстоянии от поверхности. Основанием этому является известный факт кругооборота заряженных капель воды в атмосфере: мелкие капли, наиболее вероятно заряженные отрицательно поднимаются вверх против вектора напряженности естественного электрического поля, крупные капли, наиболее вероятно заряженные положительно опускаются вниз [76]. Условная граница смены знака электрического заряда (скачок) указывает местоположение фазового перехода [152]. Эта граница двух фаз для аэрозолей очень чувствительна к смене условий, имеет характер самостоятельной фазы, определяя свойства дисперсной системы в целом [2, 120].

К оценке натурной электризации капель воды. Коагуляционный и контактный механизмы электризации частиц воды при столкновениях в аэрозольном облаке разнятся формой зависимости среднего заряда $\langle q \rangle$ частиц от их диаметра d [158]: при слиянии частиц $\langle q \rangle \sim d^3$, при разрыве временного контакта $\langle q \rangle \sim d^2$. Учитывая, что при испарении капля без слияния квадрат диаметра линейно убывает со временем, а заряды обретают тенденцию к уменьшению лишь на последней стадии испарения [159, 160], указанная зависимость приближается к линейной, обретая характер отношения $\langle q \rangle / r = k_1$, где r – радиус капли (мкм), $\langle q \rangle$ – среднее абсолютное число элементарных зарядов на капле.

Для туманов величина k_1 нерегулярно слабо колеблется около постоянного среднего значения $\langle k_1 \rangle$. Для адвективных туманов в ноябре и декабре (Одесса) на высоте 42 м над уровнем моря $\langle k_1 \rangle = 10$ [158], в облаках на Эльбрусе $\langle k_1 \rangle = 13$ [152], под Ленинградом $\langle k_1 \rangle = 16$, в облаках при самолетных и аэростатных измерениях: $\langle k_1 \rangle = 18$ и 20 , соответственно [160], в аэродинамической аэрозольной трубе [7] $\langle k_1 \rangle = 11,8$ [158].

Из известных схем [161] разделения электрического заряда при разрыве контакта «вода – вода» выделяют схему Натансона

[154, 155, 161 – 163] с формой $\langle k_1 \rangle = \sqrt{8\pi nr} / 3$, определяющую причину электризации сферической малой капли случайной (гауссовой) флуктуацией плотности объемного заряда или концентрации n элементарных электрических зарядов в капле. По сравнению с экспериментальными данными [152] форма Натансона завышала значения $\langle k_1 \rangle$ в 50 – 100 раз. Позднее успешно использовалась средне-оценочная форма $\langle k_1 \rangle = \beta 10^3 kT / q_e$ [1] с эмпирическим множителем $\beta \sim 1$. В предположении подверженности случайным флуктуациям не плотности объемного заряда в капле, а потенциала двойного слоя на границе разрыва контакта между капельками, форма $\langle k_1 \rangle = \frac{1}{q_e} \sqrt{\frac{8\pi A \epsilon_0 \epsilon kT}{l}}$ давала согласие с экспериментом в диапазоне радиусов водных капель 1 – 15 мкм [155].

На рис. 34 показаны: линии тренда: $\langle q \rangle = 9,1r + 13$ при достоверности аппроксимации $R^2 = 0,77$ для положительного знака зарядов (+), $\langle q \rangle = 8,7r + 13$ при $R^2 = 0,83$ для отрицательного знака зарядов (-) и порога чувствительности прибора $q_{\min} = 0,27r^2$ (рис. 34 а); для абсолютного электрического заряда $\langle q \rangle = 14,9r - 24$ при $R^2 = 0,95$ с порогом чувствительности прибора $q_{\min} = 0,0335r^3$ при $R^2 = 0,9992$ (рис. 34 б).

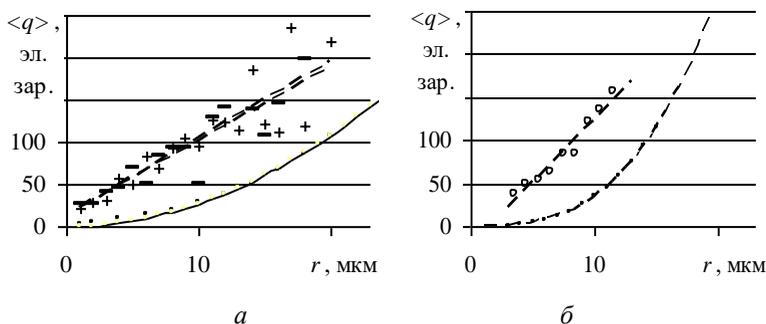


Рис. 34. Экспериментальные графики $\langle q \rangle(r)$ по данным: [2, 9] (а), [155, 157] (б)

II.2. Анализ вариантов увлажнения вертикальной нагретой струи метеотрона

В качестве транспорта электрических зарядов до уровня инверсионного слоя было предложено использовать частицы водяного пара, образующегося при встрече потока нагретого водно-капельного аэрозоля с нагретой струей ТУМ. Нагретая «сухая» струя факела метеотрона становилась «влажной» с аналогией генератора Ван-Граффа на парах воды с последующей устойчивой и односторонней электрической связью образующегося облака с факелом пламени метеотрона. Для получения вертикальной мощной влажной нагретой струи, переносящей непрерывно электрический заряд вверх по вертикали и обеспечивая режим стационарного конвекционного тока при работе метеотрона, необходимо было решить сложные технологические задачи сохранения неизменными вышеперечисленных качеств струи. При введении водно-капельного аэрозоля струя обязана сохраняться мощной нагретой и вертикальной. Эти три качества объединяются одним параметром – вертикальным механическим импульсом.

Возможны два способа технологического перехода от «сухой» струи к «влажной» с сохранением вертикального механического импульса [164, 165]: 1. Использование естественного радиационного прогрева поверхности земли и перепада давления с эффектом вертикальной осевой тяги на активном участке нагретой струи для интенсивного испарения воды под пламенем и ее вовлечения в виде паро-воздушной смеси в центральную область факела пламени, и, далее, на молекулярном уровне, непосредственно в струю; 2. Обеспечением условий естественного самозахвата (вовлечения) паро-воздушной смеси с собственным вертикальным импульсом.

Первый вариант предполагает наличие быстро прогреваемого водяного резервуара под очагом пламени. Технологическое решение по этому варианту известно с начала 80-х годов 20 века под названием проект «Суперметеотрон» в бассейне озера Севан для инициирования развития кучевых облаков выше препятствующего слоя изотермии в атмосфере [138]. Такой метеотрон с проектной

мощностью 1 млн. кВт, генерирующий вертикальную струю горячего газа с температурой 1000 К и начальной скоростью до 500 м/с предназначался для опытной проверки возможности управляемого переноса больших объемов воды в облаках. Проект не был реализован «в железе» по причине вполне обыденной – начала перестройки. Многие научные проекты «встали» и, далее, прекратили существование по этой причине, или, точнее, благодаря многочисленным ее последствиям. Работа авторов в экспериментальной части также закончилась в это же время по причине резкого подорожания авиационного керосина – топлива метеотрона. Но в начале 80-х годов авторы серьезно рассматривали возможность создания локализованного резервуара типа «колодца» под установкой метеотрон и подачи в него компрессором воды из соседнего озера с перепадом высот около 15 метров. Если бы задача стояла только в эффективном забросе массы воды на высоты слоя изотермии, то, вероятно, авторы остановились бы на этом варианте, и, вне всякого сомнения, «претворили бы в жизнь». Однако, цель была иная (см. выше). Технология электризации распределенного потока с открытой поверхности водяного бассейна в условиях интенсивной тепловой радиации оказалась не эффективной, громоздкой и дорогой. Авторы остановились на втором из вышеуказанных вариантов.

Для сохранения и даже увеличения вектора вертикального механического импульса принципиально возможно совместить оси естественно-конвективной струи метеотрона и вынужденно-конвективной струи турбореактивного двигателя, работающего на том же топливе. В области контакта струй установить в вынужденно-конвективную область центральное тело, генерирующее по периферии пароводяной аэрозоль. Нагретая вертикальная струя метеотрона оказывается затопленной в нагретом влажном «динамическом коконе». Технологически система по вертикали получается очень громоздкой и трудно реализуемой в полевых условиях на экспериментальном полигоне отдельно взятой кафедры физики. Следовательно, одним из трех обозначенных качеств струи (см. выше) надо жертвовать. Здесь следует отметить, вообще говоря,

вертикальных струй-то две: легкая (немассовая) тепловая вертикальная – радиационный конус со слабо выраженной динамикой положительной плавучести и тяжелая (массовая) – активный участок нагретых продуктов сгорания. Вообще говоря, на активном участке эти струи часто совпадают. Далее, на пассивном участке массовая инерционная струя наклоняется в сторону противоположную направлению вращения Земли и «сдвигается» под действием ветровой нагрузки, которая и в тихую погоду существует из-за выраженной орографии поверхности. Таким образом, введение водного аэрозоля в область вовлечения на активном участке струи как минимум неоднозначно по пути дальнейшего его следования.

Технология локальной боковой подачи воды в область вовлечения струи метеотрона известна, проста, но и весьма проблематична с позиции эффективного увлажнения мощной струи [165]. Для обеспечения максимального для естественно-конвективных «сухих» струй значения константы вовлечения окружающего воздуха угол между условной осью водно-капельного потока и вертикалью активного участка струи ТУМ должен быть как можно меньше без нарушения вертикальности основной струи и ограничения поступления воды непосредственно в факел. Для этого водно-капельный поток обязан автономно подниматься почти вертикально, контактируя и механически не воздействуя на основной поток. Более мощная струя метеотрона на всей длине активного участка должна непрерывно вовлекать контактные области водно-капельной струи в собственное вертикальное движение. Указанная автономность водно-капельной струи должна «заканчиваться» на выходе активного участка из радиационного конуса струи ТУМ.

Для бокового вывода водно-капельного потока к активному участку струи ТУМ возможны два варианта: опустить очаг пламени относительно уровня сопла ТРД или приподнять сопло, обеспечивая струе ТРД вертикальную составляющую. Первый вариант приводит к сближению нижней кромки пламени с поверхностью земли, ограничению доступа воздуха, ухудшению системной газовой динамики при горении, нарушению сплошности объемного горения и

к формированию вышеуказанных негативных процессов. Вторым вариантом, учитывая интенсивное испарение капель воды на внутренней поверхности конуса нагретой струи, увеличивает время подготовки водно-капельного аэрозоля снаружи в поле теплового излучения [18, 20], придает паро-воздушному потоку автономность подъема к контактной области вовлечения. Малые частицы имеют существенную вероятность попадания в эту область [21, 166, 167].

Для обеспечения распределения капель по размеру в водно-капельном потоке в диапазоне малых размеров и при малых потерях воды в выпадениях из потока крупных фракций требуется решить следующие задачи [167]:

1. Моделирование конструкции и относительной ориентации площадки разбрызгивателя;
2. Обеспечение эффективного расходного соотношения воздух/вода;
4. Определение эффективной длины потока по признаку устойчивого смещения распределения к малым размерам капель.

Совокупность обозначенных качеств водно-капельной струи приводит к созданию нагретой высокоскоростной пароводяной струи с заметной вертикальной составляющей механического импульса в области контакта. На условно «холостом» ходу до контакта со струей метеотрона в водно-капельной струе должны полностью пройти процессы барботирования и дробления воды высокоскоростным нагретым потоком, сопровождающимися интенсивным испарением. Слабая закрутка обеспечит выраженное распределение диаметра капель по сечению струи и выпадение наиболее крупных капель из распределения до контакта с основной струей. Перепад температур в подготовленной к контакту пароводяной смеси и начального сечения струи метеотрона столь большой, что при сближении наступает мгновенное вскипание смеси. Пароводяная струя исчезает – визуально, как бы срезается вертикальной «тепловой плоскостью» – по всей длине вертикального активного участка струи продуктов сгорания ТУМ.

Экспериментально реализованный в полевых условиях алгоритм физических процессов следующий: забор воды из естественного резервуара, подкачка до уровня компрессора, подача воды на площадку разбрызгивателя при выходе сопла работающего ТРД (см. рис. 2, 3), пленочный срыв массы воды с площадки струей нагретых продуктов сгорания, барботирование и дробление воды высокоскоростным нагретым потоком, интенсивное испарение капель воды, доставка потоком нагретого паро-воздушного аэрозоля на активный участок вертикальной нагретой струи метеотрона [1, 2] (см. рис. 6). Однако, уже первые серии полевых экспериментов по моделированию нагретых водно-капельных потоков по указанному алгоритму не позволили не только не сохранить вертикальный механический импульс струи метеотрона, но и вызвал существенное задымление активного участка по указанной «тепловой плоскости» (см. рис. 6). Это требовало изменений относительного расположения элементов метеотронного комплекса «Атмосфера» (МКА).

Интенсивное тепловое излучение пламени метеотрона позволяет располагать ТРД на предельном расстоянии 20 – 25 м, задающим минимальное расстояние до кромки пламени по горизонтали. По вертикали сопло ТРД находится на заданном конструкционном уровне: около 3,5 м над поверхностью земли и ниже начального сечения струи метеотрона на 3 м. Горизонтальная водно-капельная струя ориентирована в «фокус» очага пламени [1] (см. рис. 3). Именно поступление воды в факел приводит к нарушению процесса горения, сажеобразованию, задымлению струи и потере вертикальной дальноточности. Для предотвращения негативных процессов необходимо направить струю ТРД под углом выше начального сечения струи метеотрона с реализацией второго варианта бокового вывода водно-капельного потока к активному участку струи. Сопутствующее увеличение длины при интенсивном испарении капель воды на внутренней поверхности конуса нагретой горизонтальной струи, увеличивает время подготовки водно-капельного аэрозоля снаружи в поле теплового излучения факела метеотрона (см. выше).

Проекты интенсификации электрической зарядки струи.

Конструкция ТУМV [1, 2] позволяет создавать экологически чистые струю и колонку за счет высокого качества и степени дисперсности топливоздушнoй смеси. Сухая нагретая струя [113, 167] имеет концентрацию зарядов не более 10^{-12} Кл/м³ [168] и работает как маломощный ионно-конвекционный генератор на сажевых частицах [25]. Как указывалось выше ожидать мощных электрических полей в предоставленных условиях, очевидно, не приходится. Для увеличения концентрации заряженных частиц необходимо увеличить или создать достаточное количество носителей. В 1981 году было предложено несколько вариантов решения проблемы:

1. Поставить штативы ТУМV на изоляторы, на горелки подать большой электрический потенциал (порядка 10^4 В, отрицательный), под факелом пламени поместить десяток автомобильных покрышек, которые при воздействии сильной тепловой радиации будут активно «газить» с поверхности, интенсивно создавая малые сажевые частицы – носители электрического заряда;

2. По п.1 заменить поверхность автомобильных покрышек поверхностью воды. Для этого следовало поставить установку на (в) водяной бассейн, который при воздействии сильной тепловой радиации будет активно «испарять», создавая паро-водяные частицы – носители электрического заряда и работая также как оптическая линза в ИК диапазоне.

Первая идея была апробирована заранее – за год до предложения, когда авторы проверяли «запас экологичности» по наличию в нагретой вертикальной струе метеотрона сажевых частиц. Две автомобильные покрышки (шины) от автомобиля ЗИЛ-130 «испарились» за 30 минут работы без следа на поверхности земли и без следов в нагретой струе метеотрона. Они просто исчезли без видимого задымления струи. Была показана жизнеспособность этой идеи, но она все же не была реализована по той же причине, по которой создавалась экологически чистая струя.

Вторая идея не была реализована авторами по простой причине – нехватки рабочих рук и времени. О финансировании гово-

речь не приходится, т.к. его никогда и не было. Понятно, что все что делалось, делалось инициативно самими авторами, и из-за время- и трудоемкости претворения этой идеи от нее пришлось отказаться. Через пять лет идея была претворена в профинансированном со стороны АН СССР проекте «Суперметеотрон», разработанным группой ученых Института Физики Земли им. О.Ю. Шмидта и Прикладной Геофизики [138]. Но, в СССР как всегда не вовремя наступила перестройка и озеро Севан, на котором собирались по готовому проекту ставить метеотрон тепловой мощностью в 2,5 раза больше мощности ТУМV, осталось в неприкосновенности.

Авторы же использовали третий вариант – введения непосредственно на активный участок вертикальной нагретой струи потока водяного пара в потоке продуктов сгорания от турбореактивного двигателя ВК-1 [1, 2] (см. рис. 6). Вода из озера расходом 20 л/с подавалась на площадку, помещенную на оси выхода ТРД с температурой до 1000 К [1, 15]. Интенсивное разбрызгивание с площадки и испарение воды в потоке приводит к значительной электризации пароводяной смеси. Что же касается тепловой мощности ТУМV, то только дублирование данной установки с простановкой горелок рядом (увеличения их до 4-х), увеличивало радиус R пламени вдвое, а тепловую мощность ($\sim R^2$) в 4 раза и без построений и обслуживаний очень высоких труб «Суперметеотрона» [138]. Но перестройка подошла к г. Владимиру, цена на керосин взметнулась вверх, владимирский политехнический институт (место работы авторов) не смог его оплачивать. Более того, и поначалу керосин вообще пропал. Его невозможно было заказать несколько лет. В последний раз авторы получили емкость 76 м³ керосина в мае 1985 года, разгрузили и перевезли на полигон. После этого встала альтернатива: либо работает полгода установка метеотрон, либо работает полигон. Полигон работал и работает непрерывно круглый год. Все помещения регистрационных комплексов обогревал «метеотронный керосин». Этим керосином пользовались все работники до последнего времени. Сам метеотрон закончил «свои выступления» в конце 1986 года. Он мог работать только в СССР.

II.3. Эксперименты по генерации водного аэрозоля

Оригинальная конструкция площадки (насадка) 4 разбрызгивателя (рис. 35) обеспечивала эффективную генерацию водяного аэрозоля (рис. 36) в интервале расходов воды (40 – 100) л/с на номинальном режиме работы ТРД типа ВКІА [164 – 166, 15, 16, 147].

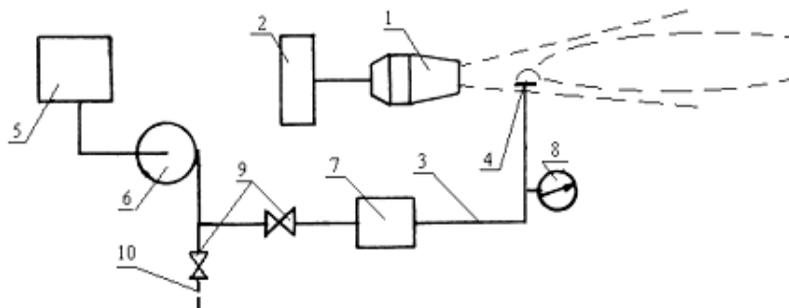


Рис. 35. Принципиальная схема системы генерирования паро-водяной струи и транспортировки ее в нагретую струю ТУМВ [16, 147, 166]



a



б

Рис. 36. Компьютерная версия фотографий распылительной части (1 – 4 по рис. 1) при работе системы генерации водного аэрозоля в нагретой струе ТРД при двух неоптимальных ориентациях насадка разбрызгивателя относительно оси сопла ТРД: 60° (*а*); 45° (*б*)

Относительное расположение площадки 4 на реальной установке (рис. 36) в полевых условиях определено экспериментально по соотношению оптимального распределения скорости воздушного потока относительно заданного ТРД по признаку качественного диспергирования с получением результирующего максимального количества капель наименьшего размера в аэрозольной струе при минимальных потерях воды. При этом надо помнить, что собственно струя ТРД также не лишена частиц. В состав микро-загрязнений топлива ТС-1, помимо твердых соединений железа, кальция, магния, натрия с зольными элементами, входят смолы, вода и даже сухие растительные остатки из окружающей среды. Однако, количество микро-загрязнений в топливе ТС-1 из отстойного резервуара не превышает 1 грамм на тонну топлива, а дисперсионный состав частиц находится в интервале размеров 1 – 40 мкм с подавляющим превалированием частиц размером 1 – 3 мкм (90 %) [21]. И по этой причине в качестве транспорта электрических зарядов до уровня

инверсионного слоя использовались частицы водяного пара, образующегося как на поверхности конуса нагретой струи ТРД, так и при встрече потока паро-водного аэрозоля с нагретой струей от факела метеотрона.

Элементы 1 – 4 в обозначениях рис. 1 конструкции в рабочем состоянии показаны далее на компьютерной версии фотографий (рис. 36, 37).



Рис. 37. Компьютерная версия фотографии распылительной части (1 – 4 по рис. 1) при работе системы генерации водного аэрозоля в нагретой струе ТРД при оптимальной ориентации 50° насадка разбрызгивателя относительно оси сопла. Номинальный режим работы ТРД: 8000 об/мин, средняя начальная скорость – 400 м/с, температура продуктов сгорания на срезе сопла 600°C . Расход воды – 100 л/с, максимальная дальность – 68 м [147]

При большой температуре на срезе сопла ТРД и большом скоростном напоре необходимо подобрать условия необходимые для эффективного барботирования нагретых продуктов сгорания и по-

ступающей на выход сопла воды. Для задержки и деструктуризации потока воды в область ее поступления была поставлена на насадке трубы площадка разбрызгивателя. Ее хорошо видно и на схеме (см. рис. 35) с обозначением 4, и на компьютерных версиях фотографий (см. рис. 36, 37). Большую роль играют форма и размер площадки. Но наиболее чувствителен режим разбрызгивания и формирования нагретой пароводяной струи к ориентации площадки относительно оси сопла ТРД.

Опытным путем удобнее конечно, рассматривать и менять ориентацию по углу наклона насадка относительно поверхности земли. При большом угле наклона насадка (см. рис. 36 *a*) жидкая среда при выходе не растекается по направляющей площадке, а срезается скоростным напором продуктов сгорания [147], приводя к ускоренному некачественному смешению, формированию большой крупнодисперсной водно-капельной фракции с последующей ее потерей выпадением на землю. Результирующая туманная дымка слабо насыщена водой. Авторы не сумели обнаружить четких границ этой дымки, хотя на фотографии (см. рис. 36 *a*) левая граница визуальнo выделяется. При относительно малом наклоне насадка (см. рис. 36 *б*) вода при выходе из насадка растекается по направляющей площадке, охватывая ее полностью. Возникает «не вязкий срыв с пленки» при отсутствии интенсивной мелкомасштабной турбулентности и потерей качества смешения. Необходимо не допускать формирования сплошной пленки на площадке. При уменьшении угла наклона насадка разбрызгивателя относительно оси сопла ТРД (см. рис. 36 *б*) размер горизонтальной площадки на выходе разбрызгивателя возможно скорректировать ее удлинением. Струя продуктов сгорания ТРД захватывает поток воды в нагретый скоростной «кокoн». Периферийные слои инерционного потока воды нагреваются и срываются. Вся струя воды сбалансировано смещается в целом вниз в поле тяготения и вверх в результате прогресса. Объемное расширение струи свидетельствует о завершении формирования паро-воздушной фазы с характерными особенностями: зависанием над поверхностью земли и четко очерченными гра-

ницами. Получающееся тепло насыщенное водой аэрозольное облако (см. рис. 36 б) автономно перемещалось в поле зрения при слабопеременной ветровой нагрузке (1 – 2 м/с) в форме локального адвективного тумана без заметного рассеяния и оседания. Простая оценка, основанная на стремлении сил сопротивления к минимальному значению, показывает, что для такого облака диаметром 100 м и средним диаметром капель 50 мкм верхняя предельная концентрация капель, при которой облако еще будет рассеиваться ветром, составляет $3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3}$. При большей концентрации размеры облака при ветровой нагрузке не меняются, подтверждая известный факт о практической трудности рассеяния облака при его обдувании. Облачное образование рассматривается единым объектом [21, 169]. В отличие от естественных адвективных туманов, полученное аэрозольное образование имеет положительную плавучесть и большую водность. Равновесие массовой и архимедовой сил предопределяют расположение нижней кромки водно-капельного аэрозольного образования на высоте до 2 м.

При оптимальном наклоне насадка (см. рис. 37) вода при выходе из не успевает растечься по площадке. Пленка не успевает полностью сформироваться. Барботирование нагретых продуктов сгорания ТРД с водным потоком происходит непрерывным пленочным срывом сплошной воды с направляющей площадки, захватом и дроблением скоростным напором струи ТРД, результирующим рассеянием в пределах активного участка (до 10 м) и текущим испарением. Водная капля с диаметром $d = 50 \text{ мкм}$ захватывается потоком и за 0,05 с обретает его характерную скорость. Величина этого интервала времени пропорциональна d^2 , поэтому малые частицы разгоняются быстрее крупных [21].

Итак, при относительно большом угле наклона насадка с направляющей площадкой скоростная нагретая струя малой водности эффективно сопрягается и вовлекается в вертикальную струю метеотрона, практически не затормаживая последнюю; при относительно малом угле наклона насадка заторможенная охлажденная струя большой водности попадает на начальное сечение струи ме-

теотрона в область догорания, нарушая этот процесс. В результате слабого вовлечения из-за больших масс и нарушения процесса горения, получаем нагретую сильно задымленную струю с сохраненной водностью. Вертикальная нагретая струя становится более массовой и, вероятно, менее заряженной отрицательно при резонном предположении о превалировании транспорта крупных частиц положительного заряда. Вероятно, и по той же причине в первом случае струя получает больший отрицательный заряд, но не настолько большой, чтобы пренебрегать ее водностью. Третий вариант при угле насадка 50° является своего рода компромиссным. С одной стороны при достаточно низкой водности туманно-образное облако не формируется, с другой стороны пленочные срывы позволяют генерировать в нагретую струю продуктов сгорания ТРД огромное количество мелких капель. Это обеспечивает их быстрое движение по потоку, прогрев, испарение и эффективное вовлечение в вертикальную струю метеотрона выше уровня начального сечения активного участка струи. В этом случае процесс вовлечения имеет не вихревую природу захвата струей приграничных течений. Нагретая пароводяная струя от ТРД на определенном расстоянии «срезается» – мгновенно испаряется и исчезает, принимая свойства и поглощаясь окружающим разогретым воздухом.

II.4. Вертикальный транспорт водяного пара нагретой струей метеотрона до уровня слоя инверсии

Турбореактивный двигатель (ТРД), система подачи воды и метеотрон составили метеотронный комплекс «Атмосфера» (МКА) (рис. 38, 39). Относительное расположение системы устройств МКА схематично представлено на рис. 4 в проекции фотоснимка. Вода подавалась по водопроводу к направляющей площадке разбрызгивателя 4, расположенной на оси сопла ТРД 2. Нагретый водяной аэрозоль подавался в направлении начального сечения струи метеотрона 1, работающего при открытом сгорании топлива керосин ТС1. Топливо подавалось из емкости 7 системой подкачивающих насосов 5 низкого давления к насосам высокого давления 3.

Фотография (рис. 35) сделана оператором на насосах 5 (место съемки* (рис. 38)). На сориентированной схеме показана «роза ветров» (РВ), а наблюдатель 6 в белой рубашке включен в качестве контрастной масштабной единицы. Расход воздуха в объем факела ТУМ при полном сгорании топлива составляет около 10^4 м³/с, поэтому системы подачи и распыления способны обеспечить содержание воды в струе 10 г/м³. Очевидно, что выбранное наземное расположение ТРД и системы подачи воды не позволяет «достреливать» водный аэрозоль до начального сечения тепловой колонны факела без взаимодействия с радиационным излучением очага пламени, что приводит к снижению эффективности по потерям воды.

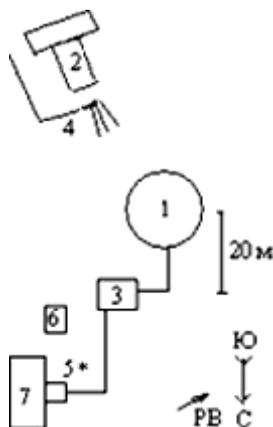


Рис. 38. Схема расположения элементов МКА по рис. 35 [170, 171]



Рис. 39. Компьютерная версия фотографии работы МКА [171]

При работе ТУМV на номинальном режиме пароводяной аэрозоль в потоке струи ТРД мгновенно испарялся, как бы «срезался» на значительном расстоянии от факела, оставляя в качестве последствия задымление (рис. 39). Циркуляционные течения в конечном итоге втягивали паро-воздушную смесь в вертикальную

струи ТУМV, но в вертикальный температурный конус радиационного прогрева попадали лишь малые частицы. Большая часть паров воды выпадала или уходила на пассивный участок струи (рис. 40 *а*). Облачный след по «РВ» на слое изотермии был получен (рис. 40 *б*, *в*), но пробить слой влажной нагретой струей не удалось.



а



б



в

Рис. 40. Компьютерные версии фотографий работы МКА при образовании облачного следа – от начала работы: через 20 минут (*а*), через 40 минут (*б*), через 60 минут при выключенной установке (*в*)

В рамках рассматриваемой системы устройств пришлось уйти от номинального (без задымления) режима работы метеотрона в сторону снижения мощности тепловыделения сближением и «приземлением» горелок на штативы высотой 1 м (малый метеотрон – Метеотрон VI). При слабой и медленно формируемой циркуляции воздуха появилась возможность подавать водный аэрозоль непосредственно в нагретую вертикальную колону [170].

П.5. Электрические процессы в струях метеотрона и ТРД

Горизонтальная нагретая струя ТРД. Данные по регистрации параметров горизонтальной скоростной нагретой струи дальностью $l = 60 - 70$ м при работе ТРД типа ВКИА (см. рис. 5, 37, 40 *a*) приведены во введении на страницах 19, 20. Продублируем некоторые из них [15, 16, 147]. В ортогональном направлении в интервале расстояний (10 – 100 м) от оси струи напряженность электрического поля струи достоверно спадает по гиперболическому закону: $E = 0,7r^{-1,0}$, В/м; в осевом – обретает максимум на расстоянии 6 диаметров струи. С увеличением числа оборотов n компрессора ток с корпуса двигателя монотонно растет, а избыточный электрический заряд в приосевой области струи меняет знак. В стационарной точке приема ток с ионометра в струе достоверно меняет знак дважды.

Известно, что ионы в камере сгорания ТРД и при выходе в струю могут стимулировать гомогенную нуклеацию и ускорять коагуляцию мелких частиц электростатическим взаимодействием. Основными ионами, эмитируемыми турбореактивными двигателями, являются NO^+ и HSO_4^- [45], которые быстро [46], на расстоянии до 1 м от среза сопла, превращаются в кластерные ионы вида $\text{HSO}_4^-(\text{H}_2\text{SO}_4)_n$ и $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ (см. с. 34). При характерной концентрации ионов на срезе сопла $1,2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$, концентрации сажевых частиц 10^7 см^{-3} со средним диаметром 10 – 200 нм [24, 29], резонно предположить, что такие сажевые частицы взаимодействуют с ионами $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_2$ и $\text{HSO}_4^-(\text{H}_2\text{SO}_4)_3$ организуя конвекционный ток и квазиэлектростатическое поле. Взаимодействие ионов с сажевыми частицами может представлять эффективный механизм их гибели [29] за счет роста размера частиц при коагуляции и их отслоения в поле гравитации.

С увеличением числа оборотов компрессора появляется эффект закрутки струи, сопровождающейся интенсификацией разделения электрических зарядов по знаку и приосевым обратным током. Положительная корреляционная взаимосвязь распределений

скоростей и токов с ионометра с увеличением числа оборотов компрессора упрочняется [15, 16].

Прежде чем попасть в восходящий поток воздуха, нагретого пламенем метеотрона, капли проходят со струёй реактивного двигателя горизонтальный участок длиной около 20 м, а при выключенном ТУМ – до 70 м. В турбулентном потоке от ТРД осуществляется: дробление и испарение капель жидкости, вводимой в газовый поток, увлечение капель газовым потоком и сообщение им определенной конечной скорости. При распылении и испарении воды в струе реактивного двигателя, капли разных размеров приобретают электрические заряды разных знаков [22]. Более крупные заряжаются положительно, а мелкие – отрицательно. На этом участке происходит разделение электрических зарядов в гравитационном поле. Большая часть относительно крупных капель под действием гравитационных сил «выпадает» из струи на землю. Тогда капельки тумана, попадающие в струю метеотрона, несут избыточный отрицательный заряд. В струе за счет испарения капли становятся меньше и потенциал их растет. Этот процесс должен приводить к появлению дополнительных градиентов потенциала электрического поля и его пульсациям, обусловленным турбулентным характером движения струи.

Конвекционный ток нагретой струи метеотрона. Контакт пароводяного тумана струи ТРД с фронтом пламени метеотрона нарушает процесс горения, стимулируя интенсивную генерацию сажевых частиц в зоне контакта. Такая процедура применяется и в производстве саж – вода впрыскивается в зону высоких температур [44]. Полученные при дроблении воды капли «замегают» при своем движении частицы сажи. Число захваченных частиц определяется суммарной поверхностью захвата. При дроблении и как следствие, увеличении концентрации капель при уменьшении их сечения (исходный объем воды один и тот же) суммарная поверхность захвата растет. Количество захваченных частиц сажи растет и растет заряд на каплях, уносимый вверх по потоку.

Наличие заряда на аэрозольных частицах существенно меняет динамику образования и их свойства. С одной стороны взаимодействие ионов с сажевыми частицами может представлять эффективный механизм гибели ионов. С другой стороны, сажевые частицы могут аккумулировать как положительный, так и отрицательный заряд и, эффективно взаимодействуя с диполями молекул воды, способствовать их быстрому накоплению, испарению и гидратации на своей физически и химически активной поверхности [29].

Вероятно, электрические заряды одного знака переносятся конденсированными частицами продуктов неполного сгорания топлива. В этом случае, используя данные, полученные в [29, 56], можно объяснить факт изменения при определенной температуре полярности генерируемого тока. Согласно этим данным склонность угольной пыли, переносимой в газовом потоке, к зарядке зависит от ее физических свойств. Обожженная пыль имеет склонность к образованию отрицательных зарядов, необожженная – положительных [56]. Но это лишь частность. Известны более общие закономерности. Так в струях всех типов авиационных газотурбинных двигателей переносится избыток заряда одного знака. Однако, при отсутствии внешнего электрического потенциала величина и полярность заряда зависят от типа двигателя и режима его работы. При наложении электрического потенциала на двигатель в струе будет переноситься избыток заряда той же полярности, что и приложенный потенциал. Величина переносимого заряда увеличивается с увеличением наложенного потенциала [55]. Картина еще более усложняется, если признать, что если заземленный через направляющие корпус ТРД находится в поле заряженного динамического объекта, например, заряженной струи метеотрона заданной полярности, то на нем индуцируется заряд противоположной полярности. Тогда и горизонтальная струя от него примет противоположную полярность заряду струи метеотрона. Суммарный процесс временных вариаций напряженности электрического поля должен содержать нелинейный процесс отрицательной обратной связи – заряда

струи ТРД и заряда струи метеотрона. Для величины сдвигки существенным становится первичность одного из двух взаимодействующих процессов. Если включается сначала ТРД и выходит на режим, а потом включается метеотрон, полярности струй могут, как совпадать так и не совпадать. Если полярности струй с самого начала совпадают, то суммарный нелинейный процесс более выражен во времени. Второй случай должен дать результат менее выраженного во времени процесса и быть сопоставим по результату со случаем смены очередности включений источников струй.

Процессы электризации капель топлива при форсуночном распылении, хемионизации, термической эмиссии и положительной поверхностной ионизации на частицах сажи в разной степени обеспечивают в объеме факела пламени присутствия небольшого избыточного отрицательного электрического заряда [1, 2]. По результатам зондовой диагностики [172] преобладающим процессом электрической зарядки пламени назначен процесс положительной поверхностной ионизации атомов калия на частицах сажи. Оценка предельных возможностей указанного механизма ионизации приведена ранее на странице 51. Показано, что регистрация магнитной антенной [84, 173] магнитного поля нагретой струи при работе метеотрона в пересчете ее на полуограниченный линейный электрический ток дала результат 8 – 10 мА, что при указанной чувствительности к температуре является вполне правдоподобным. Нагретая вертикальная струя уносит малый отрицательный электрический заряд [74, 174]. Газодинамические пульсации в нагретой струе с разномасштабной турбулентностью приводят к возникновению характерной вариабельности напряженности электрического поля в диапазоне частот от сотых долей до единиц Гц [3].

III. Лабораторное моделирование генерации электрически заряженных водно-капельных потоков

III.1. Моделирование потоков электрических зарядов

Постановка задачи. Детальное исследование явлений, механизмов и закономерностей распределения и динамики электрических зарядов в приграничном слое атмосферы, разработка способов управления параметрами вариаций электрических полей требуют решения задачи по созданию объекта воздействия, например: искусственным сообщением электрического заряда (электризации) естественной слабо заряженной восходящей нагретой струе метеотрона. Электризация может быть осуществлена принудительным введением в струю электрических зарядов малой подвижности, так чтобы эти заряды, захватываемые и увлекаемые нагретой струей, совершали работу против сил электрического поля. При этом на высоте, определяемой вертикальной дальностью нагретой струи, или положительной плавучестью, при заданных условиях стратификации должна образовываться область объемного заряда с потенциалом тем большим, чем меньше подвижность носителей. Исследования могут быть полезными для выяснения механизмов образования и роста электрически заряженных грозовых облаков.

Моделирование водно-капельных потоков. Для отработки процессов принудительной электризации холодной воздушно-водяной капельной струи, была создана модельная лабораторная установка для моделирования процессов генерации водно-капельных потоков с масштабным приближением модельных процессов к полевым. Первая установка в части распыления и обдува состояла из пульверизатора 1, емкости 2 для распыляемой не нагретой (комнатной температуры) воды, установленной на изоляторе 3 и компрессора 4. Пульверизатор исполнял роль направляющей площадки разбрызгивателя на оригинальной установке, и в модельной установке был помещен в струю теплого воздуха, который подавался по трубопроводу компрессором 5 к насадку 6. Струя капель 7 оседала на металлической пластине коллектора 8 (рис. 41).

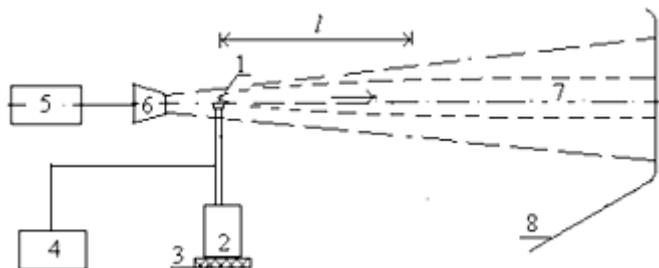


Рис. 41. Схема лабораторной установки генерации горизонтального водно-капельного потока

Расположение распылителя после насадка компрессора нагнетаемого потока соответствует схеме метеотронного комплекса генерации бездымной влажной струи [165, 166, 175]. Его расположение относительно насадка определено по оптимальному соотношению распределения скорости воздушного потока относительно заданного пульверизатором по признаку качественного диспергирования с максимальным количеством капель наименьшего размера в аэрозольной струе. Вариативность около среднего расхода $\langle Q \rangle = 0,278$ г/с разбрызгиваемой дистиллированной воды оценивалась в пределах $\pm 0,052$ г/с без учета максимального значения $Q_{\max} = 0,385$ г/с в начальный интервал времени 13 с при включении и расходе первых 5 мл воды (прил. 4).

Методика регистрации и оценки размеров капель в потоке. Представительство фракций водно-капельной дисперсной фазы по размеру сферических капель определялось микрофотографированием парафинированной стеклянной пластинки, пронесимой через капельную струю на расстоянии l от пульверизатора (см. рис. 41). При расстоянии $l = 25$ мм и $l = 50$ мм стекло пронеслось сквозь струю ортогонально потоку за время не более 0,1 с. С одной стороны время осаждения капель подбиралось с расчетом не допущения укрупнения капель при их слиянии. С другой стороны при больших расстояниях l время «засветки» увеличивалось, чтобы плотность капель на парафине была бы достаточной для анализа.

На рис. 42 приведена компьютерная версия фотографии фрагмента парафинированной поверхности пластинки с каплями под микроскопом МБС-9 с ценой деления шкалы окуляра 0,0138 мм.

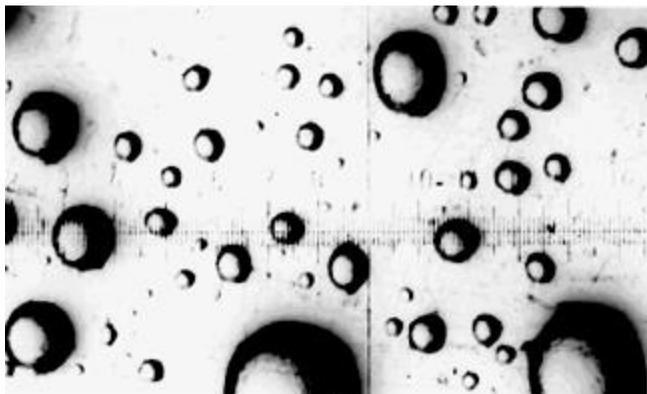


Рис. 42. Компьютерная версия фотографии фрагмента покрытой парафином стеклянной пластинки с каплями воды под микроскопом. Пленка микрат-300, выдержка при максимальной освещенности 0,5 с. Фотоаппарат «Praktica»

В поле тяготения на поверхности парафинированной пластинки капля воды полностью не смачивает поверхность парафина, обретая приплюснутую форму. Измеряемый радиус r капли на поверхности превышает исходный радиус r_c свободной капли сферической формы [176]. С ростом радиуса капли нарастает и область ее деформации при контакте с поверхностью: от пренебрежимо малой локальной деформации (ямки) в зоне контакта для малых капель, до полностью деформированных форм капель (рис. 42).

Оценки размеров капель, захваченных пластинкой из потока, проводилась с учетом деформации их формы на плоской поверхности. С ростом контактирующей с поверхностью капли можно обозначить последовательные приближения трансформированных форм: исходная сфера, сфера без малого шарового сегмента («плафон»), полусфера, эллипсоид вращения, диск. Проведя деление этих форм на исходную – предельную, получим три ряда трансформа-

ций: сфера – полусфера, полусфера – эллипсоид вращения и эллипсоид вращения – диск. Нетрудно оценить отношение измеряемого радиуса r капли на парафиновой подложке к приведенному радиусу r_c сферической формы капли: 1 – 1,26, 1,26 – 1,64 и 1,64 – 1,7, соответственно по каждому ряду трансформаций (прил. 5).

Качественный анализ не позволяет определить точно расхождения размеров капли вне поверхности и на поверхности, но позволяет утверждать: 1. При открытом распылении водопроводной воды образовывался полидисперсный гомогенный водный аэрозоль с превалированием капель, превышающих средние размеры капель облаков и туманов в 10 – 20 раз. 2. Измеренный радиус капель из начала распределения ($r = 42$ мкм) превышает r_c не более 2 %; 3. «Хвосты» распределений капель по размерам вне поверхности, вероятно, ограничиваются размером $r_c = 100 – 150$ мкм.

Статистические параметры капельных следов. По данным микрофотографирования парафинированной стеклянной пластинки (см. рис. 42) получены шесть наборов численных значений диаметров капель для сечений потока на шести разных расстояниях l от пульверизатора. При анализе представительства диаметров d сферических капель в потоке в зависимости от расстояния l от пульверизатора, оцененное частотами попаданий $\Delta N/N$ значений диаметров капель в соответствующий интервал гистограмм (рис. 43) [166], обнаружена характерная для многих аэрозолей асимметрия кривых распределения частиц по размерам.

При росте l сильная асимметрия полигона уменьшается с результирующим смещением наиболее вероятного значения диаметра капель в сторону трехкратного укрупнения [177] с падением представительности, указывая на нелинейную интенсификацию коагуляции капель по длине струи. Оказалось, что поиск соответствия параметров струи конвекционному току на коллектор требует проведения измерений в приближении к насадку ($l = 25 – 50$ мм).

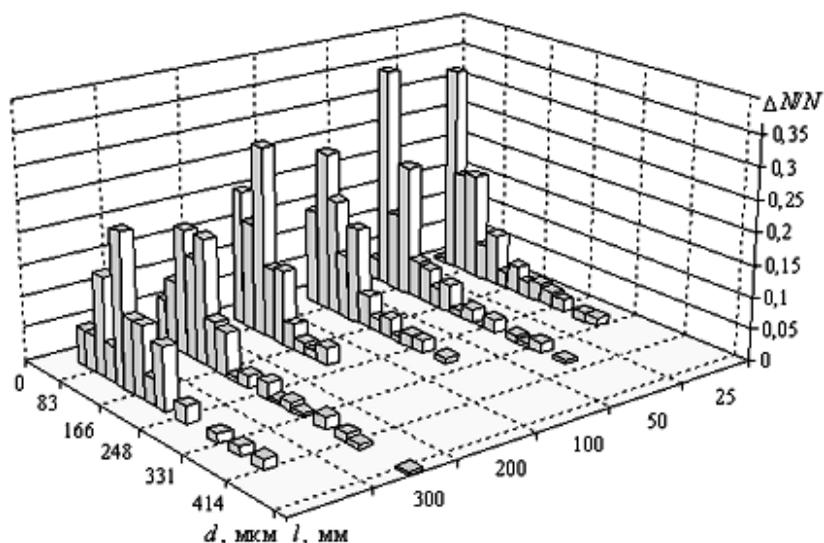


Рис. 43. Гистограммы распределений капель по диаметру d в распыленной струе на расстоянии l от сопла pulverизатора

В воздушном водно-капельном потоке происходит системное перераспределение капель по диаметрам в полном соответствии с распределением скоростей, сопровождающееся их интенсивными контактными взаимодействиями. Процессы слияния капель вблизи ($l = 25 - 100$ мм) при высокой скорости воздушного потока завершаются разбрызгиванием с уменьшением диаметра, а по мере торможения начинают превалировать ($l > 100$ мм) с последующим интенсификацией выпадения в поле тяготения крупных фракций (более 300 мкм) в интервале $\Delta l \sim (200 \div 300)$ мм.

Определяющим эффектом статистической обработки является выбор методики определения среднего значения параметра. В таблице 5 приведены значения среднего ($\langle d \rangle$) и медианного (d_{ME}) диаметра капли, суммарной средней площади $\Sigma \langle S \rangle$ капель в проекции на пластину и суммарного среднего объема $\Sigma \langle V \rangle$ капель числом N от расстояния l .

Таблица 5. Параметры капельных следов на пластине

№ опыта	N	l , мм	d_{ME} , мкм	$\langle d \rangle$, мкм	$\langle d \rangle^2$, мкм ²	$\langle d \rangle^3$, мкм ³	$\Sigma \langle S \rangle$, мм ²	$\Sigma \langle V \rangle$, мм ³
1	160	25	62,1	85,9	7379	633840	0,927	0,425
2	200	50	55,2	80,3	6448	517782	1,013	0,434
3	99	100	69	91,2	8317	758551	0,647	0,315
4	155	200	69	79,3	6288	498677	0,766	0,324
5	157	300	96,6	119,1	14185	1689411	1,749	1,111
6	71	400	104,4	132,8	17636	2342040	0,984	0,697

По изменению суммарных средних величин площади $\Sigma \langle S \rangle$ капель в проекции на пластину и их объема $\Sigma \langle V \rangle$, как количества фиксируемой на пластинке воды, можно сделать некоторые выводы о методике проведения опытов. С увеличением l значения $\Sigma \langle S \rangle$ и $\Sigma \langle V \rangle$ меняются одинаково (рис. 44 а). Эти изменения качественно повторяет и функция $N(l)$ (рис. 44 б), а поведение функций $\langle d \rangle(l)$ и $d_{ME}(l)$ противоположно. При известной неточности определения размеров капель в категориях среднего и медианного, обращает внимание одинаковый тренд их роста с ростом l .

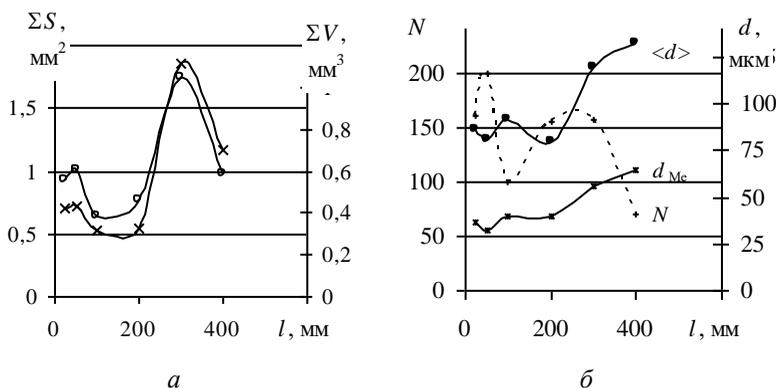


Рис. 44. Параметры капельных следов на парафинированной поверхности пластинки: $\Sigma \langle S \rangle$ (о), $\Sigma \langle V \rangle$ (х) (а) и N (+, штрих), $\langle d \rangle$ (•), d_{ME} (ж) (б)

Проанализируем ход параметров (табл. 5). В первых четырех опытах величины $\langle d \rangle$ и d_{ME} практически неизменны при одинаковом количестве, захваченной пластиной воды. При слабом падении $\langle d \rangle$ и 30% росте N значения $\Sigma\langle S \rangle$ и $\Sigma\langle V \rangle$ меняются одинаково – в слабый рост. При слабом росте $\langle d \rangle$ и двукратном падении N значения $\Sigma\langle S \rangle$ и $\Sigma\langle V \rangle$ меняются одинаково почти двукратным падением. При совместном росте $\langle d \rangle$ и N значения $\Sigma\langle S \rangle$ и $\Sigma\langle V \rangle$ меняются одинаково сильно в рост – почти в три раза. Далее $\langle d \rangle$ возрастает в два раза, а N падает в два раза. Это сопровождается почти двукратным падением значений $\Sigma\langle S \rangle$ и $\Sigma\langle V \rangle$. Такой ход графиков функциональных параметров капельных следов на парафинированной поверхности пластинки объясняется следующими факторами: 1. Представительство наиболее мелкой фракции капель в интервале размеров $13,8 \div 20,7$ мкм значительно увеличивается при $l = 50$ мм. Известно, что частицы мелкой фракции существенно больше определяют концентрацию (N), чем $\Sigma\langle V \rangle$ и $\Sigma\langle S \rangle$, которые определяются в основном частицами крупных фракций [21]; 2. Средний диаметр капли обретает тенденцию к росту лишь на достаточно больших расстояниях l . Вероятно, это связано с торможением больших капель в потоке и поглощением ими догоняющих малых капель.

Логарифмически-нормальное распределение диаметров капель в водно-капельном потоке. Характерным признаком многих аэрозолей является скошенность кривой плотности вероятности распределения частиц по размерам. Асимметрия исчезает и распределение приводится к виду нормального, если вместо диаметров частиц использовать их логарифмы. Для логарифмически-нормального распределения (ЛНР) среднее значение и стандартное отклонение определены средним геометрическим диаметром d_g и стандартным геометрическим отклонением σ_g , а функция плотности вероятности [21, 178]:

$$f(d) = \frac{1}{d \ln \sigma_g (2\pi)^{0,5}} \exp \left[-\frac{(\ln d - \ln d_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right],$$

удовлетворяя условию нормировки: $\int_0^{\infty} f(d) dd = 1$. Заметим, что в этом случае стандартное геометрическое отклонение σ_g представляет отношение диаметров, поэтому является безразмерной величиной. Интервал размеров, которые имеют 67 % частиц, заключен в границах $(d_g/\sigma_g, d_g \sigma_g)$.

Для проверки обоснованности предположения об ЛНР диаметров капель в любом сечении модельной водно-капельной струи проведен сопоставительный анализ характерных особенностей функций распределений, определенных по форме кривых экспериментальных полигонов. По данным микрофотографирования парафинированной стеклянной пластинки, вводимой в капельную струю на расстоянии l от пульверизатора, получены шесть рядов диаметров капель (см. табл. 5). Для фиксированного значения l каждый ряд диаметров капель был разбит на интервалы Δd и рассчитаны относительные частоты попаданий в них диаметров, нормированных на величины интервалов, или $\Delta N/(N\Delta d)$. Для проверки обоснованности предположения об ЛНР диаметров капель в любом сечении модельной водно-капельной струи проведен сопоставительный анализ характерных особенностей функций распределений, определенных по форме кривых экспериментальных полигонов нормированных на величины интервалов $(\Delta N/(N\Delta d))$. По большему значению каждого интервала Δd были рассчитаны значения функции $f(d)$ Результаты представлены в графическом формате на рис. 45. Все расчеты и оформление сделаны в программном обеспечении *Excel* [177].

Сопоставление графиков функции плотности вероятности логарифмически- нормального распределения и графиков, построенных по экспериментальным данным (рис. 45), показало, что даже для относительно небольших объемов выборочных рядов размеров, соответствие экспериментальных распределений логарифмически-нормальному закону, очевидно.

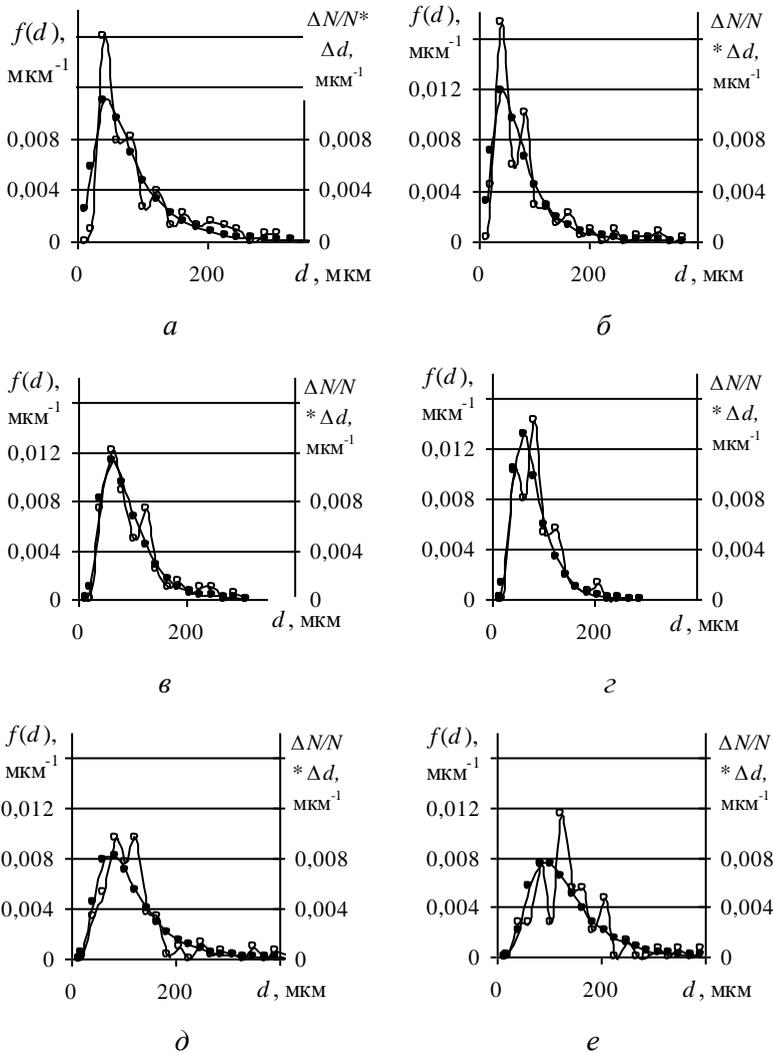


Рис. 45. Функциональные $f(d)$ (•) и экспериментальные $\Delta N/(N\Delta d)$ (o) графики распределений капель по размерам в струе pulverизатора в зависимости от расстояния l от насадки сопла: 25 мм (а), 50 мм (б), 100 мм (в), 200 мм (г), 300 мм (д) и 400 мм (е)

Подтверждением ЛНР частиц по размеру d служит график прямой линии на логарифмически-вероятностной координатной сетке (рис. 46), формируемой по горизонтали суммарной долей частиц с размерами равными или меньшими наибольшего размера каждого интервала размеров ($\Sigma\Delta N/N$, или x), а по вертикали – наибольшим размером соответствующего интервала d_{im} [21]. В таблице 6 приведены принятые обозначения по рис. 46, уравнения линий тренда и коэффициенты (R^2) достоверности аппроксимации.

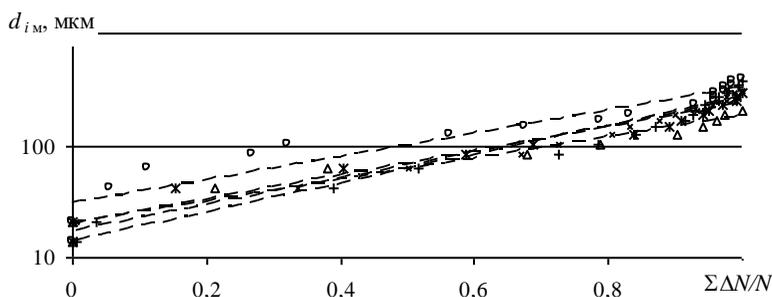


Рис. 46. Экспериментальные данные по шести опытам на логарифмически-вероятностной координатной сетке. Приведены линии тренда

Таблица 6. Обозначения и уравнения трендовых линий (по рис. 46)

l , мм	Обозначения	Уравнение линии тренда (рис. 4) (d_{im} , мкм)	R^2
25	x	$d = 16,8e^{2,7x}$	0,97
50	+	$d = 13,7e^{3x}$	0,95
100	ж	$d = 19,7e^{2,5x}$	0,96
200	Δ	$d = 19,9e^{2,2x}$	0,96
300	-	$d = 23,3e^{2,7x}$	0,92
400	o	$d = 29,8e^{2,4x}$	0,91

Для каждого ряда определен средний геометрический диаметр d_g и стандартное геометрическое отклонение σ_g , а также иные характерные диаметры капель, подпадающие под различные определения для разных значений параметра p (табл. 7). При этом использо-

валось известное соотношение $d_p = d_g \exp(pln^2 \sigma_g)$, которое является общей формой уравнения Хэча-Чоута [21], используемого для преобразования данных по измерению количества частиц в данные по измерению их массы и, наоборот, для логарифмически-нормальных распределений частиц по размерам [21].

Таблица. 7. Характерные статистические диаметры капель в зависимости от l [179]

Диаметр, мкм	Параметр p	l , мм					
		25	50	100	200	300	400
Мода	-1	62,8	58,1	76,1	68,4	96,1	112,7
Средний геометрический	0	68,2	63,1	79,8	71,2	101,6	118,1
Средний арифметический	0,5	71,2	65,8	81,8	72,7	104,5	120,8
Среднеквадратичный	1	74,2	68,6	83,7	74,2	107,5	123,7
Средне-кубический	1,5	77,4	71,5	85,8	75,8	110,6	126,6
Поверхностный медианный	2	80,7	74,6	87,8	77,3	113,7	129,6
Массовый медианный	3	87,7	81,1	92,1	80,6	120,3	135,8
Массовый средний	3,5	91,4	84,5	94,4	82,3	123,7	139,0

Экспериментальная функция нормированных относительных частот ($\Delta N/(N\Delta d)$) качественно описывается функцией $f(d)$ плотности вероятности ЛНР, но имеет и отличительные признаки [177]:

1. Выделяемые с шагом $d_{нв}$ характерные размеры капель большего представительства повторяются по длине струи. Рост представительности капель с $d_{нв}$ продолжается до $l = 50$ мм. При росте l значение $d_{нв}$ смещается вправо в сторону роста, но при этом в области малых значений d качество динамики возобновляется с тем же интервалом $d_{нв}$ (см. рис. 45 $z - e$);

2. На расстояниях $l > 300$ мм форма распределения капель по размерам в сечении отходит от ожидаемой ЛНР в сторону обретенной симметрии по шкале $0d$. Вероятно, на этом расстоянии струя теряет связь с источником и обретает автономность в формировании распределения капель по размерам с превалированием иных

механизмов – внесистемных для струи и системных для аэрозольного облака;

3. Волнообразное формирование кривой экспериментального полигона около функции $f(d)$ характерно для всех расстояний l от насадка сопла [179] с постоянным интервалом повторяемости качества динамики вероятности события d с интервалом 41,4 мкм, равным наиболее вероятному значению $d_{\text{нв}}$ (см. рис. 45 $a - e$).

Волнообразная форма распределения вероятностей по размерам капель пока не поддается осмыслению. Авторы не исключают возможные артефакты влияния технологической природы, но напоминают, что подобные формы экспериментальных распределений упоминались и ранее при биофизических исследованиях [180 – 183], и в частности, в трактовке С.Э. Шноля [181].

Моделирование электрической зарядки капель в вертикальной пароводяной струе. Для исследования возможности провокаций искусственных разрядов молниевоего типа в свободной атмосфере возникла необходимость электризации восходящей нагретой струи метеотрона для создания электрически заряженного объемного капельного кластера на уровне смены знака температурного градиента или на уровне конденсации. Оценочные предварительные расчеты показали, что в рамках временного интервала эксперимента (около 1 часа) минимально необходимый вертикальный конвекционный ток при отсутствии поперечного сдвига должен составлять десятки миллиампер. Ионный ток такой силы можно обеспечить и в лабораторных условиях за счет автоэлектронной или термоэлектронной эмиссии. При этом требуются сильные электрические поля ($\sim 10^7$ В/см): в первом случае – непосредственно для создания автоэмиссионных потоков, во втором – для поддержания эффективности работы поверхности эмиттера, аккумулирующего пространственный отрицательный заряд [184].

При моделировании полевых условий использование баллоэлектрического эффекта для электризации капелек жидкого топлива при их форсуночном распылении (механическом разрушении) не требует применения устройств генерации мощных электрических

полей, но позволяет распределить заряды разных знаков на каплях разных размеров. Сопутствующие процессы испарения, воспламенения и горения капель приводят к резкому уменьшению их размеров и росту подвижности, интенсифицируя процессы рекомбинации в объеме факела пламени до максимума в начальном сечении струи. Поэтому при очевидной простоте и естественности реализации этого способа сообщения электрического заряда «сухой» струе мезотрона, и с учетом относительно небольших скоростей восходящего потока (до 30 м/с), возникающие конвекционные токи (около 10 мкА) на продуктах сгорания не способны обеспечить решение поставленной задачи [113].

Все составляющие этого системного процесса сопровождаются естественной и разной по механизму слабой электризацией капель аэрозоля. Усиление электризации требует искусственной – принудительной электрической зарядки капель.

Для обеспечения электрических зарядов малой подвижностью необходимо сохранить размеры их носителей (транспорта) в приемлемых пределах, исключив из цепочки воздействий на них в объеме пламени процессы воспламенения и горения. В проведенных экспериментах в объем пламени подавали неактивную среду в форме электрически заряженных капель водяного аэрозоля, получающегося при распылении воды нагретой струей ТРД (см. рис. 39, 40 а) [175]. В восходящем потоке продуктов сгорания, преимущественно отрицательно заряженные малые частицы отделялись в поле тяготения от более тяжелых периферийных частиц преимущественно противоположного знака. Вертикальная «влажная» струя нагретых продуктов сгорания приобретала относительно земли отрицательный потенциал [74], а конвекционные токи возрастали на порядок [17], но не достигали необходимой силы. При таких условиях, характерных для первых 15 минут работы до формирования циркуляционной зоны [185], роль сажевых частиц в транспортировке электрических зарядов восходящей струей падает, а роль поступающих и испаряющихся капелек воды растет в обеспечении конвекционного тока [175].

Электризация потока коронным разрядом. Часто для электризации воздушных потоков используется коронный разряд, не требующий высоких температур и естественно возникающий при нормальных давлениях с поверхности большой кривизны электродов высокого потенциала (проводов малого диаметра и острий). В рамках поставленной задачи коронированные электрические заряды в «холодную струю» водяного тумана, образованного системой генератора водяного аэрозоля [175], «захватываются» капельками воды с последующим транспортом в струю метеотрона и подъемом восходящим потоком до слоя конденсации [125, 186]. По мере подъема происходит замедленное испарение капель без потери заряда с ростом их потенциала и подвижности [158], создавая благоприятные условия для пробоя [187].

Когда ток коронного разряда определяет ток разрядки иглы электрода на вольтамперную характеристику короны, сильное влияние оказывают: потенциал и геометрия тела, потенциал начала коронирования, скорость набегающего потока, размер, плотность числа аэрозольных частиц, плотность вязкость и диэлектрическая проницаемость воздуха, подвижность ионов [188 – 190]. Известные эмпирические формулы, полученные в условиях полета [191] и аэродинамической трубе [192, 193] невозможно распространить на условия обдува коронирующих острий аэрозольным потоком.

Для выбора конструкции коронирующих электродов, их расположения относительно струи генератора водяного аэрозоля для натурального варианта системы сообщения электрического заряда струе метеотрона были проведены модельные лабораторные эксперименты по исследованию зарядки капель воды и распределению зарядов по знаку, по длине и по сечению сухой и влажной естественно-конвективной струи. Принудительная электризация капель пароводяной фазы производилась постоянным разрядом электрической короны с конца (острия) металлической иглы, системы игл.

Струя воздуха, создаваемая компрессором 2, направлялась насадкой 1 на коронирующее устройство одного или нескольких острий 3. Потенциал струи измерялся с помощью киловольтметра 5.

Заряды, коронирующие с острия, увлекались струей воздуха и попадали на коллектор (цилиндр Фарадея), ток на землю с которого измерялся прибором 7. В установку также входит компрессор с парогенератором 9 и распылителем 8 пароводяного аэрозоля при температуре 100°C (рис. 47).

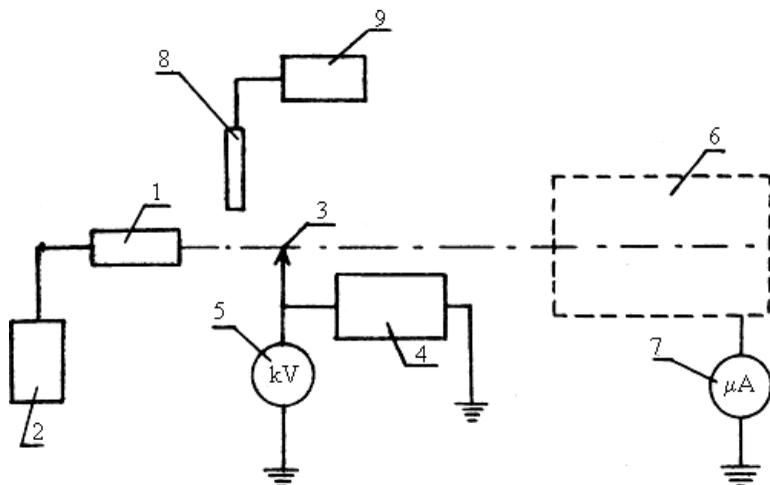


Рис. 47. Схема лабораторной установки электризации потока капель пароводяного аэрозоля: насадок (1) компрессора (2), устройство коронирования (3), источник высокого напряжения (4), киловольтметр (5), коллектор (6), измеритель тока коронирования (7), распылитель (8) от компрессора парогенератора (9)

На рис. 48 *а* представлен график зависимости тока с двух параллельно разнесенных игл при заданном потенциале на них $U = 12$ кВ от расстояния l между иглами. При увеличении расстояния от 0 до 20 мм, ток нарастает быстро, при дальнейшем росте l скорость нарастания силы тока ослабевает и при $l > 80$ мм становится незначительным.

На рис. 48 *б* представлен результат эксперимента, в котором изменялся вылет иглы из круглого металлического диска. По оси абсцисс отложено отношение вылета иглы x к диаметру диска ($d =$

35 мм), на оси ординат отложен ток короны. Из графика видно, что при $x/d > 0,6$ ток короны максимальный.

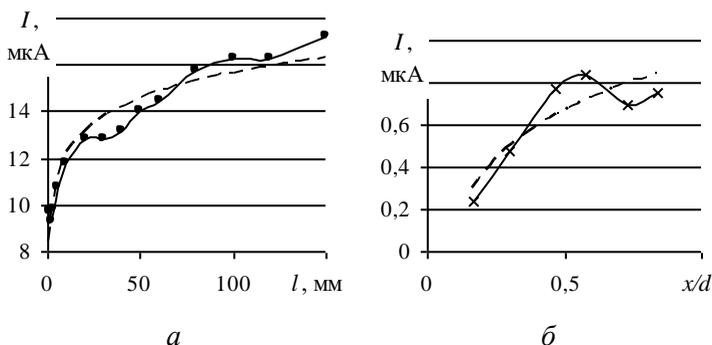


Рис. 48. Графики зависимости тока: с двух параллельных иглол при $U = 12$ кВ от расстояния между ними (а); с одной иглы в зависимости от ее вылета, нормированного к диаметру диска (б). Линии тренда $I = 1,6\ln(l) + 8,4$ и $I = 0,34\ln(x/d) + 0,90$ показаны штриховой линией при коэффициентах аппроксимации $R^2 = 0,93$ $R^2 = 0,80$, соответственно

В воздушном потоке изменение радиуса кривизны острия практически не влияет на ток короны в широких пределах от десятков до сотни мкм [188]. В аэрозольном потоке наблюдается резкое падение (в 2 – 3 раза) тока короны за счет двух основных факторов: снижением скорости переноса зарядов и ростом экранировки разрядника объемным зарядом. В первом случае скорость аэрозольных частиц много меньше скорости движения ионов, а во втором – оседание аэрозольных капель приводит к уменьшению коронирующей поверхности, т.е. с эффектом аналогичным уменьшению вылета иглы.

Следует указать недостатки примененного механизма электризации потока коронным разрядом. В модельном эксперименте спонтанный процесс естественной генерации объемной и пространственной распределенной ионизации подменяется локальной ионизацией с распространением ее области на транспортах частиц пароводяной фазы. Значения силы тока короны с конца (острия) металлической иглы оказались на 3 – 4 порядка ниже требуемых. Приме-

нение системы распределенных игл более чем на порядок увеличивает ток короны. Но и это решение позволяет создать лишь предпосылки условий разрядки, так как способ истечения зарядов с острий (коронный разряд) оказался неэффективным при введении игл в поток частиц именно жидкого аэрозоля.

Вероятно, наиболее эффективным способом сообщения электрического заряда струе в полевых условиях, хорошо сочетающимся с системой распыления и транспортировки капель воды в струю метеотрона, представляется электризация восходящего потока распыленных капель жидкости с устройства, работающего по принципу электрогазодинамического генератора.

Моделирование электризации потока электрогазодинамическим генератором. Одним из реальных способов сообщения электрического заряда струе в полевых условиях, сочетающимся с системой распыления и транспортировки капель воды в струю метеотрона, представляется электризация восходящего потока распыленных капель жидкости с устройства, потенциал которого относительно земли поддерживается на определенном уровне. При работе электрогазодинамического (ЭГД) генератора, основанного на заряджении капель жидкости при их дроблении при барботаже высокоскоростным газовым потоком в сильном электрическом поле, полезный конвекционный ток обусловлен переносом аэрозольных электрически заряженных частиц. При росте потенциала величина избыточного заряда каждой капли той же полярности, срывающейся с поверхности устройства, увеличивается [55, 188].

Известны конструкции дозвуковых и сверхзвуковых ЭГД генераторов [55, 188, 194, 195], используемые в исследовательских и прикладных работах, в частности, для обеспечения нейтрализации заряда, образующегося на самолете при полетах в облаках и осадках [191]. В отличие от них газо- и гидродинамические элементы конструкции ЭГД генератора создавались с максимальным приближением к реальной системе водяного тумана и транспортировки его в тепловую струю метеотрона [175]. Простейшими лабораторными аналогами источников искусственно-конвективной струи ТРД и

нагретой влажной струи могут служить обычная воздуходувка (пылесос, работающий в режиме «реверс») и «носик» кипятильника, соответственно [196]. В лабораторной установке по электризации холодной воздушно-водяной капельной струи распыляемая вода подавалась компрессором 4 из емкости 2, установленной на изоляторе 3, к пульверизатору 1, помещенному в струе воздуха от компрессора 5 и насадка 6. Струя капель 7 оседала на коллекторе 8 металлической пластины, ток с которой измерялся гальванометром 9 (тип М-95). Разность потенциалов между пульверизатором и землей поддерживалась высоковольтным источником 10 и измерялась вольтметром 11 (тип С96), а ток с пульверизатора – гальванометром 12 (рис. 49).

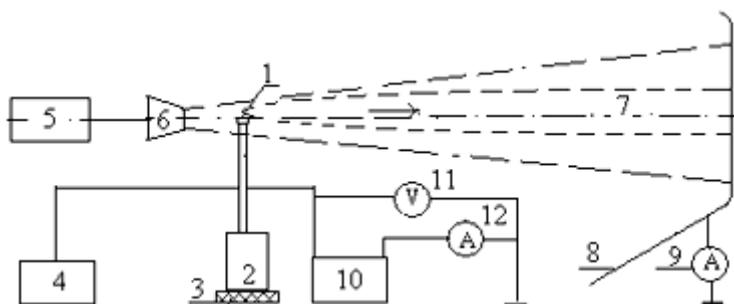


Рис. 49. Схема лабораторной установки электризации водно-капельной струи

Предлагаемое устройство ЭГД генератора [71] отличается от известных устройств расположением распылителя после насадка (сопла) компрессора нагнетаемого воздушного потока, что соответствует и реальной системе [175, 179]. Аэрозоль формируется не внутри насадка [188], а вне его – открытым способом (рис. 45). Относительное положение насадка определено экспериментально по качеству диспергирования с получением результирующего максимального числа капель малого размера в аэрозольной струе.

Статическая электризация капель воды при работе ЭГД генератора определена действием двух процессов: электролитическим

на твердой поверхности и распылительным при барботаже. В первом процессе капли воды с большой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 78 - 81$) при отрыве от твердой поверхности уносят электрический заряд, определенный их размером и потенциалом поверхности. Во втором процессе разрушается поверхностный слой каплей воды с повышенной концентрацией зарядов с неочевидным последующим распределением зарядов по величине и знаку на каплях разного размера [21, 196]. Из известных схем [162] разделения заряда при разрыве контакта «вода – вода» выделим схему Натансона [161] электризации случайной флуктуацией концентрации диссоциированных ионов, которая позволяет образованным при распылении каплям содержать несколько избыточных элементарных зарядов [21, 155, 161, 162].

При моделировании на лабораторной установке генерации водно-капельного потока [2, 166], ортогональное взаимодействие вертикального аэрозольного потока из пульверизатора и горизонтальной струи воздуха из насадка компрессора приводит к «сдвигу» аэрозольного потока в горизонтальном направлении с формированием «поджатого» воздушно-капельного потока. «Вмороженные» в воздушный поток капли несут малый отрицательный заряд так, что струя в целом электрически заряжена слабо отрицательно [2]. Средством водных капель к электрическому заряду следовало воспользоваться, принудительно заряжая капли, подавая на пульверизатор потенциал 10^4 В с устройства постоянного потенциала относительно земли. Этот контактный способ сообщения электрического заряда при электризации капельно-воздушной смеси, как и коронный разряд, сочетается с процессами распыления и транспортировки капель воды в струе [197]. Уже на начальном участке формирования потока следовало ожидать электрического деления относительно больших капель (см. рис. 43, 45). Наиболее вероятное значение в распределении капель по размерам имело тенденцию к смещению в сторону меньших размеров на малых начальных расстояниях l от сопла пульверизатора, нейтральность – на средних расстояниях и укрупнение капель – на дальних [166].

Для выяснения механизмов электризации водно-капельной струи предыдущая лабораторная модель была немного изменена [177]. Пульверизатор 1 был помещен в струю воздуха, поступающего по изолированному трубопроводу 4 от компрессора 5 на насадку 6. Струя капле 7 из емкости 2, установленной на изоляторе 3, улавливалась на металлической пластине коллектора 8, ток с которой на землю регистрировался гальванометром 9. Разность потенциалов U между пульверизатором и землей поддерживалась высоковольтным источником 10 и измерялась вольтметром 11, а ток с пульверизатора регистрировался гальванометром 12 (рис. 50 *а, б*).

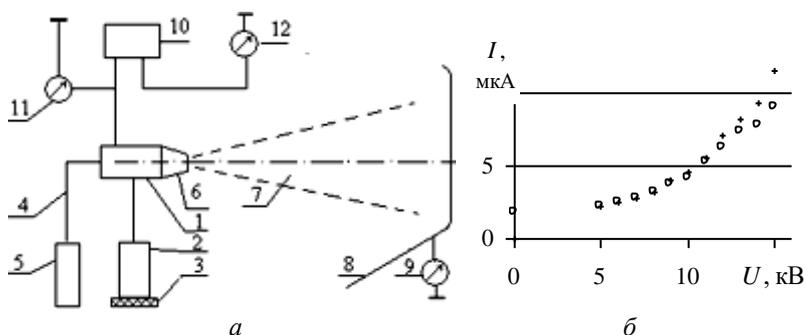


Рис. 50. Схема установки электризации распыленной водяной струи (*а*) и зависимость тока I от потенциала U коллектора (+) и распылителя (o) при приведенном расходе воды $G = 0,278$ г/с с линией тренда $I_{пр} = 0,35U^{1,13}$ при достоверности аппроксимации $R^2 = 1$ (*б*) [164]

По результатам измерений (см. табл. 5, рис. 44 *б*) для $\Delta l = 25 \div 200$ мм величина $\langle d \rangle$ практически неизменна. Для $l = 25$ мм (вблизи сопла насадки) средний объем капли:

$$\langle V_k \rangle = \frac{\sum_i V_{ki}}{N} = \frac{\pi \sum_i d_{ki}^3}{6N} = \frac{3,14 \cdot 781,5}{6 \cdot 72,5^3} = 0,0011 \text{ мм}^3, \text{ и } \langle V_k \rangle = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3,$$

где $\frac{\sum_i d_{ki}^3}{N} = 781,5$ дел³, а переводной коэффициент для d_{ki} равен $(1/0,0138) = 72,5$ (дел/мм).

Расход воды через пульверизатор оценивался средним значением $\langle Q \rangle = 0,278 \pm 0,052 \text{ см}^3/\text{с}$ (прил. 4). Поэтому эквивалентное по расходу среднее число капель одного размера:

$$\langle n \rangle = \langle Q \rangle / \langle V_k \rangle = 0,278 / 1,1 \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}.$$

При постоянном потенциале пульверизатора $U = 10^4 \text{ В}$, среднем диаметре капли $\langle d_k \rangle = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ (радиусе $\langle r \rangle = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ см}$) следовало ожидать среднюю емкость капли

$$\langle C_k \rangle = 4\pi\epsilon_0\epsilon \langle r \rangle = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4,2 \cdot 10^{-5} \approx 4,7 \cdot 10^{-15} \text{ Ф}.$$

При постоянном расходе воды G и давлении компрессора воздуха рост потенциала U на распылителе относительно «земли» сопровождался одинаковым ростом тока I с распылителя и коллектора до значений $U = 10 \text{ кВ}$. Далее, при росте U , ток с коллектора начинал превышать исходный ток. Отношение этих токов растет слабо пропорционально росту U , указывая на влияние электрического поля распылителя на потенциал металлической пластины коллектора (см. рис. 50 б). Оставляя в стороне это влияние и проводя исследования в пределах 10 кВ, получаем постоянство среднего электрического заряда $\langle q \rangle$ в струе при фиксированном значении U . Электрический заряд, уносимый каплями воды в единицу времени с пульверизатора (распылителя), адекватно определяет величину конвекционного тока до разности потенциалов 10 кВ.

Для конвекционного тока $\langle q \rangle = I/\langle n \rangle$, где средний расход капель одинакового среднего размера (диаметра $\langle d \rangle$) $\langle n \rangle = G/(\rho\langle V \rangle)$ при среднем объеме $\langle V \rangle$ капли воды массовой плотностью ρ . Это позволяет оценить средний заряд на капле $\langle q \rangle = I\rho\langle V \rangle/G$ и размер капли, осредненный по току с распылителя. При расходе воды $G = 0,278 \text{ г/с}$ и токе $I = 1 \text{ мкА}$ средний заряд капли определяется сильной зависимостью от среднего диаметра капли: $\langle q \rangle \approx 2\langle d \rangle^3$, Кл. С другой стороны, полагая $\langle q \rangle = \langle C \rangle U$, при емкости сферической капли $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon\langle r \rangle$ и линейной зависимости $I = kU$ получаем

$$\langle r \rangle = \sqrt{\frac{3\epsilon_0 G}{k\rho}}, \text{ что при } k = 5 \cdot 10^{-10} \text{ А/В, дает результат } \langle d \rangle =$$

243 мкм. Однако, даже среднее по потоку (в шести сечениях) значе-

ние диаметра (94 мкм) более чем в 2,5 раза меньше расчетного. Кроме этого, на расстоянии $l = 25$ мм от распылителя средний электрический заряд $\langle q_k \rangle = \langle C_k \rangle U = 4,7 \cdot 10^{-11}$ Кл, или $3 \cdot 10^8$ элементарных зарядов (q , эл. зар.), что превышает почти на порядок предел Релея ($4,45 \cdot 10^7$ эл. зар.) для капель воды с $\langle r \rangle = 50$ мкм [21]. Это ставит под сомнение, что все капли при отрыве принимают потенциал распылителя и, в свою очередь, линейную зависимость заряда капель от их радиуса [155] в описанных выше условиях эксперимента. Подтверждением первого сомнения является участок насыщения по току с распылителя при росте расхода воды (рис. 51 а) [164].

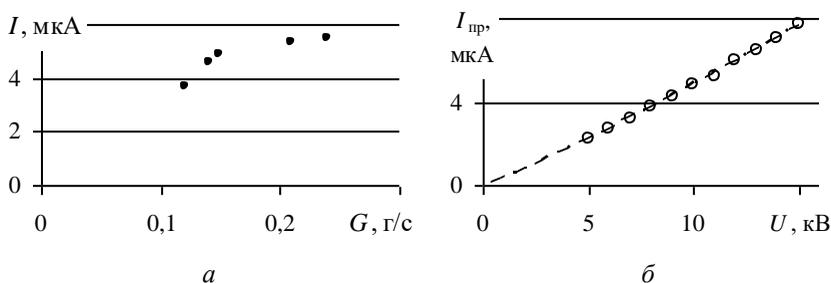


Рис. 51. Графические зависимости тока I : а – от расхода дистиллированной воды при $U = 10$ кВ; б – от потенциала распылителя U при приведенном расходе воды $G = 0,278$ г/с с линией тренда $I_{\text{пр}} = 0,35U^{1,13}$ при достоверности аппроксимации $R^2 = 1$ [164]

Фактически линейная связь тока и потенциала при постоянном расходе (рис. 51) ставит под сомнение второе допущение, так как, следуя принятой логике максимальное значение по току при $U = 10$ кВ не должно меняться и при росте U . Постоянный расход воды на заданной установке с постоянными характеристиками обдува и распыла обеспечивает постоянным среднее число капель с заданным распределением по размеру. Растущий пропорционально потенциалу ток с распылителя, указывает на рост заряда, уходящего с распылителя в единицу времени, а, следовательно, на пропорциональный рост зарядов на каплях, точно в соответствии с подвергну-

той сомнению формулой. В таком случае резонно предположить, что помимо процессов барботирования при распыле воды с обдувом воздухом, включается иной процесс – электрического дробления капель при превышении внешней силы электрического поля на поверхности капли над внутренней силой ее поверхностного натяжения. При сильных электрических полях собственный потенциал капли, ограничен указанным процессом [164]. Ток растет за счет роста количества носителей меньшего радиуса, что и позволяет переносить водно-капельному потоку больший заряд в единицу времени. Это предполагает смещение функции распределения капель по размерам в сторону меньших диаметров (см. рис. 43 б).

Это означает, что на начальном участке формирования и барботажно относительно большие капли могут делиться сами с увеличением общей поверхности капель в потоке. Тогда наиболее вероятное значение в распределении капель по размерам должно иметь тенденцию к смещению в сторону меньших размеров. Можно предположить, что именно это наблюдается при увеличении l от 25 мм до 50 мм (см. рис. 43 а, б, 45 а, б).

При расходе воды 0,28 г/с и для равномерного распределения капель по среднему радиусу $r = 4,2 \cdot 10^{-5}$ м [2, 166] образуется $2,5 \cdot 10^5$ капель/с со средней емкостью $7,7 \cdot 10^{-15}$ Ф. Заряжаясь до потенциала 10^4 В с распылителя за 1 с будут уноситься электрические заряды, определяющие силу тока:

$$I = \varphi \langle n \rangle \langle C_k \rangle = 10^4 \cdot 2,5 \cdot 10^5 \cdot 4,7 \cdot 10^{-15} = 11,7 \cdot 10^{-6} \text{ А, или } I \approx 12 \text{ мкА.}$$

При использовании среднего значения $\langle d \rangle$ вместо функции распределения $f(d)d$ получена оценка, ожидаемо превышающая в два раза результат эксперимента ($I = 5,7 - 5,8$ мкА).

Прямым подтверждением принятого механизма электризации распыленной водяной струи является отсутствие тока с пульверизатора при распылении, если на него надеть малый металлический цилиндр так, чтобы отрыв капель происходил внутри него, а вылетающая струя не касалась этого цилиндрика.

Для выбранной конструкции электростатического генератора кривая зависимости $I(Q)$ имеет форму S-образной кривой и закан-

чивается участком насыщения по току (рис. 47 а) [166]. Такая форма кривой при фиксированном потенциале пульверизатора указывает на сопряжение как минимум двух процессов: дроблением капель на выходе из форсунки пульверизатора и обдувом капельного аэрозоля струей воздуха. Эффективность этих процессов при заданных конструкциях форсуночных устройств определена оптимальным расходом воды по признаку максимальной концентрации капель, скоростным напором и структурой воздушной струи, соответственно. Эффективность сопряжения процессов обеспечивается захватом капель струей воздуха с продолжающимся дроблением.

При заданном среднем расходе воды и диаметре форсунки 1 мм начальная скорость однородной сферической капли диаметром около 100 мкм составит 0,3 м/с с числом Рейнольдса $Re = 2$. Это позволяет применить закон Стокса для анализа динамики капель воды в потоке воздуха. И поправка Каннингема C_c для частиц указанного размера, и поправка на жесткость частиц, определяемая отношением коэффициентов динамической вязкости воды и воздуха, равны единице с точностью до четвертой значащей цифры [21].

При ортогональном взаимодействии вертикального аэрозольного потока из пульверизатора и горизонтальной струи воздуха из насадка компрессора аэрозольный поток «сносится» в горизонтальном направлении разворотом векторов скорости каждой капли воды с формированием горизонтального воздушно-капельного потока, «поджатого» в границах струи воздуха. Далее капли движутся «вмороженными» в воздушный поток, испытывая перераспределение (седиментацию) по массе (размеру) в поле тяготения и слипанию (коалесценции) с образованием крупных капель (диаметром более 100 мкм), которые не могут долгое время быть суспендированными и выпадают из потока при его общем торможении.

Равенство сил Кулона и Стокса при температуре среды 20°C приводит к оценке по порядку величины средней скорости капли, или средней подвижности капель в электрическом поле единичной напряженности:

$$\langle \mu \rangle = \frac{\langle q \rangle}{3\pi\eta \langle d \rangle} = 4,7 \cdot 10^{-11} / (3 \cdot 3,14 \cdot 1,83 \cdot 10^{-5} \cdot 84 \cdot 10^{-6}) = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$$

Представленная физическая модель генерации и электризации водяного аэрозоля с оценкой подвижности капель делает привлекательным ее использование при работе системы генерирования водяного тумана и транспортировки его в тепловую струю метеотрона в реальных полевых условиях. Интенсивное дробление и испарение воды в струе ТРД и последующее «мгновенное» вскипание нагретого аэрозоля при встрече с радиационным потоком пламени приводит к резкому и быстрому подъему частиц водяного пара по вертикали с сохранением электрического заряда и увеличением потенциала каждой частицы. Сопровождающееся при этом вовлечение быстрой влажной паровой струи в более медленную струю нагретых продуктов сгорания, должно сопровождаться коагуляцией капель с частицами дисперсной фазы нагретых жестких частиц (например, сажевых) с электризацией последних. По сравнению с исходным аэрозолем средний диаметр частиц резко падает, вязкость воздуха уже в нагретой струе ТРД возрастает в 2 раза, а естественное поле Земли имеет напряженность электрической составляющей в 100 раз превышающей ранее рассмотренную единичную. Поэтому следует ожидать, что подвижность подавляющего числа частиц на уровне вовлечения вырастет в 10 раз, а их вертикальные скорости вырастут в 10^3 раз. При моделировании на лабораторной установке генерации водно-капельного потока, оказалось, что капли потока, несут малый избыточный отрицательный электрический заряд так, что струя в целом электрически заряжена отрицательно. Сродством водяных капель к электрическому заряду следовало воспользоваться, принудительно заряжая капли воды, подавая потенциал 10^4 В на сопло распылителя. Электропроводимость «влажной» струи резко возрастает с ростом числа носителей, их подвижности и при сохранении заряда. Полученные оценки являются весомыми факторами генерации естественных молниевых стримеров.

Транспортировка электрического заряда воздушно-капельным потоком. В качестве модельного объекта при принудительной электрической зарядке в лабораторных условиях служил водно-капельный поток. Чтобы капли уносили с поверхности насадка электрический заряд необходимо, чтобы жидкость обладала достаточной электропроводностью.

Накопившиеся вопросы, связанные с организацией конвективного токового процесса и с определением его характеристик, позволяет разрешить смена характеристик аэрозоля. При моделировании электрогазодинамических условий генерации естественного стримера в лабораторных условиях совершенно неважно насколько далеко исследователь уходит от природных естественных носителей электрического заряда. Эффективность работы электростатического генератора капельно-воздушной смеси определяется током,

отнесенным к расходу распыляемой жидкости:
$$\frac{I}{\langle Q \rangle} = \frac{\varphi \langle C_{\kappa} \rangle}{\langle V_{\kappa} \rangle},$$

Кл/с. Но чтобы капли уносили с поверхности электрический заряд необходимо, чтобы жидкость обладала достаточной электропроводностью. Для оценки влияния электропроводности жидкости были проведены опыты по измерению тока с пульверизатора при распылении растворов поваренной соли (гидратированных молекул NaCl) разной концентрации в дистиллированной воде. На рис. 52 и таблице 8 приведены экспериментальные значения тока с пульверизатора в зависимости от потенциала φ при разных концентрациях солевого раствора при отличающихся средних расходах жидкости.

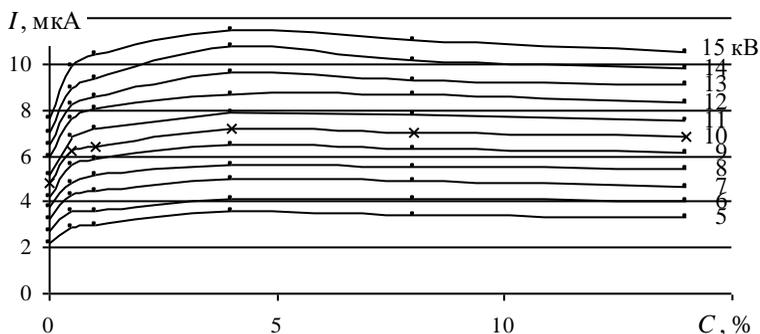


Рис. 52. Ток с пульверизатора при разных концентрациях водного раствора NaCl

Таблица 8. Приведенные по расходу значения тока с распылителя при разных его потенциалах и концентрациях NaCl в воде

φ, кВ	C, %											
	0,0		0,5		1,0		4,0		8,0		14,0	
	I, мкА	I _{пр} , мкА										
5	2,2	2,2	2,6	2,9	2,7	3,0	2,8	3,6	2,8	3,4	2,8	3,3
6	2,7	2,7	3,3	3,6	3,2	3,6	3,2	4,1	3,4	4,1	3,4	4,0
7	3,2	3,2	3,9	4,3	4,0	4,5	3,9	5,0	4,0	4,9	3,9	4,6
8	3,8	3,8	4,4	4,8	4,6	5,2	4,4	5,6	4,5	5,5	4,6	5,4
9	4,2	4,2	5,1	5,6	5,2	5,9	5,1	6,5	5,2	6,3	5,2	6,1
10	4,8	4,8	5,6	6,2	5,7	6,4	5,6	7,2	5,7	7,0	5,8	6,8
11	5,2	5,2	6,2	6,8	6,4	7,2	6,2	7,9	6,4	7,8	6,4	7,5
12	6,0	6,0	6,9	7,6	7,2	6,1	6,8	8,7	7,1	8,7	7,1	8,3
13	6,5	6,5	7,5	8,2	7,8	8,6	7,5	9,6	7,6	9,3	7,8	9,1
14	7,0	7,0	8,1	8,9	8,3	9,4	8,4	10,8	8,4	10,2	8,4	9,8
15	7,6	7,6	9,0	9,9	9,2	10,4	9,0	11,5	9,0	11,0	9,0	10,5
<Q>, г/с	0,275		0,250		0,243		0,215		0,225		0,235	
k _{пр}	1		1,1		1,13		1,28		1,22		1,17	

По оси абсцисс рис. 52 отложена концентрация соли (C, %), а по оси ординат – регистрируемый ток с пульверизатора при разных значениях потенциала. Начиная с 0,5%- концентрации рост содер-

жания соли, эквивалентное увеличению электропроводности раствора, практически не оказывает влияния на величину тока. При каждой концентрации раствора ток растет быстрее потенциала. Расхождение в скоростях роста обоих параметров нарастает и при $C = 4\%$ максимально, а затем монотонно падает с ростом концентрации раствора, оставаясь не менее $+0,6$ мкА по току.

В таблице 8 приведены экспериментальные значения тока с пульверизатора в зависимости от его потенциала при разных концентрациях солевого раствора при несколько отличающихся средних расходах жидкости. Практически одинаковый ход кривых графиков $I(U)$ для разных жидкостей на основе дистиллированной воды (одного растворителя) и линейный участок зависимости кривой графика $I(Q)$ для этого растворителя позволяют привести экспериментальные данные по разным растворам к одному расходу ($0,275$ г/с) посредством постоянных множителей – коэффициентов приведения $k_{пр}$. Коэффициенты приведения $k_{пр}$ расходу представлены в нижней строке табл. 8. Все экспериментальные значения приведены к одному значению расхода ($0,275$ г/с при $C = 0,0\%$) и представлены на рис. 53.

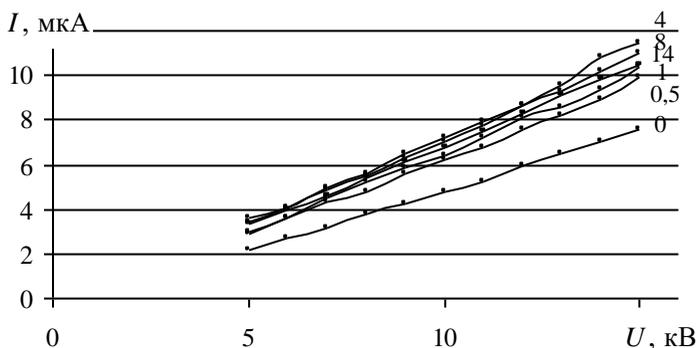


Рис. 53. Графики зависимости приведенного значения тока с пульверизатора для дистиллированной воды (0) и при фиксированной концентрации солевого раствора, указанных справа (0,5%, 1 %, 4 %, 8 %, 14%)

При увеличении потенциала пульверизатора экспериментальное значение тока струи пропорционально возрастает, что согласуется с результатами расчетов (см. выше).

Зависимость тока от потенциала, как и следовало ожидать, линейная, т. е. в интервале $5 \cdot 10^3 - 1,5 \cdot 10^4$ В влияние электрических сил на процесс распыления жидкости не обнаружено (табл. 8, рис. 53). Если считать, что потенциал всех капель, попадающих в воздушную струю, равен потенциалу пульверизатора, то заряд, уносимый за единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt} = C\varphi \frac{dN}{dt} = \frac{4\pi\epsilon_0 \langle r \rangle \varphi Q}{\langle V \rangle \rho},$$

где C – электроемкость капли, $\langle r \rangle$ – средний радиус капель, φ – потенциал пульверизатора, Q – массовый секундный расход жидкости, $\langle V \rangle$ – средний объем капли, ρ – плотность распыляемой жидкости, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Вероятно, указанная зависимость дана с точностью до постоянной величины микро-тока при нулевом потенциале (см. выше).

Моделирование капельно-пузырькового потока. Для увеличения конвекционного тока [166] необходим рост числа носителей заряда при прочих равных условиях. Очевидно, что при заданном расходе жидкости и с уменьшением радиуса капель I будет расти. Увеличения тока также можно достичь за счет образования при распылении не капель жидкости, а пузырьков радиусом r и толщиной стенки δ . В водно-капельных потоках уменьшение размеров капель и образования пузырьков при распылении можно достичь, используя жидкости с малым коэффициентом поверхностного натяжения [198]. Для экспериментальной проверки этого положения были проведены опыты по распылению мыльных растворов. Микрофотографии следов на стекле от мыльного раствора показали, что при распылении происходило образование пузырьков. На рис. 54 приведена фотография пластинки под микроскопом МБС-9 при экспозиции в капельно-пузырьковой струе воды с добавлением мыла.

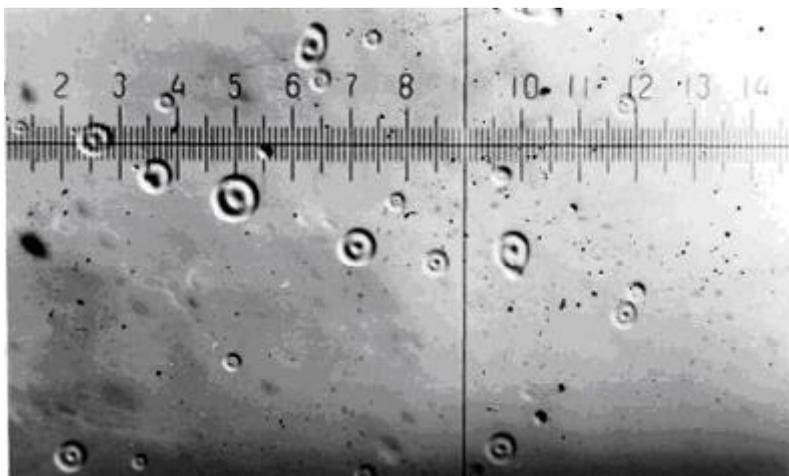


Рис. 54. Микрофотография пластинки с пузырьками под микроскопом

По данным микрофотографирования стеклянной пластинки, вводимой в капельную струю на произвольном фиксированном расстоянии l от пульверизатора [166] получен ряд численных значений диаметров капель. Ряд был разбит на интервалы Δd , по каждому из которых рассчитаны относительные частоты попаданий в них диаметров, нормированные на величины интервалов ($\Delta N/(N\Delta d)$). Гистограммы распределений величин диаметров капель в любых произвольных сечениях на длине капельно-пузырькового модельного потока показали, что формы экспериментальных полигонов соответствуют ЛНР. На рис. 55 а приведены функциональные $f(d)$ и экспериментальные графики распределений капель 20% раствора шампуня (капельно-пузырьковая смесь) по размерам в струе пульверизатора. Доказательной проверкой ЛНР частиц по d , служит график прямой линии на логарифмически-вероятностной координатной сетке (рис. 55 б), формируемой по горизонтали суммарной долей частиц с размерами равными или меньшими наибольшего размера каждого интервала размеров ($\Sigma\Delta N/N$), а по вертикали – наибольшим размером соответствующего интервала $d_{\text{им}}$ [21].

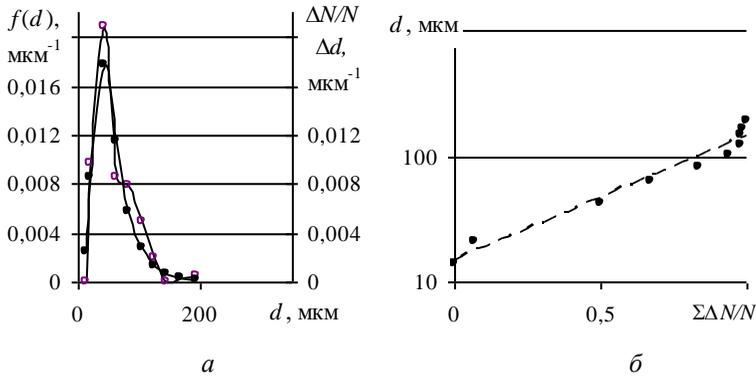


Рис. 55. Функциональные (•) и экспериментальные (о) графики распределений капель 20 % раствора шампуня (капельно-пузырьковая смесь) по размерам в струе пульверизатора (а) и экспериментальные данные на логарифмически-вероятностной координатной сетке с уравнением линии тренда $d = 14,7e^{2,28x}$ мкм при $R^2 = 0,96$ (б)

Полагая $r \gg \delta$ (рис. 56), объем шарового слоя $V = 4\pi r^2 \delta$. Тогда поток одинаковых пузырьков со средним радиусом $\langle r \rangle$ и толщиной стенки δ оценивается величиной $\frac{dN}{dt} = \frac{Q}{4\pi \langle r^2 \rangle \delta \rho}$.

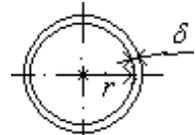


Рис. 56. Схема пузырька

Полагая, что при одинаковых условиях электризации одинаковые пузырьки имеют одинаковую емкость $C = 4\pi \epsilon_0 \langle r \rangle$ и обретают одинаковый по величине электрический заряд и потенциал, можно оценить ток зарядов с пульверизатора: $I = \frac{dq}{dt} = \frac{\epsilon_0 \varphi Q \langle r \rangle}{\langle r^2 \rangle \delta \rho}$.

Из сопоставления графиков на рис. 55 а, б видно, что:

1. Волнообразная форма экспериментальной кривой распределения вероятностей, характерная для водно-капельного потока по всем его сечениям [166], для капельно-пузырькового потока не выполняется.

2. Функциональный и экспериментальный графики распределений практически полностью совпадают, указывая на обоснованность предположения о ЛНР числовых значений пузырьков по сечению капельно-пузырьковой струи воды с добавлением мыла.

3. Среднее значение и наиболее вероятное значение для капельно-пузырьковой струи воды, приведенное к одному значению массового расхода, значительно меньше, чем для водно-капельного потока [17], и составляет 57 мкм и 41 мкм, соответственно.

Эффективность электризации носителей разной подвижности. На рис. 57 представлены результаты трех серий опытов по измерению силы тока I с пульверизатора при распылении дистиллированной воды, фиксированной 4 %-концентрации солевого раствора и 20% раствора шампуня «Рось» в дистиллированной воде. Результаты приведены к одинаковому массовому расходу $Q_{пр}$.

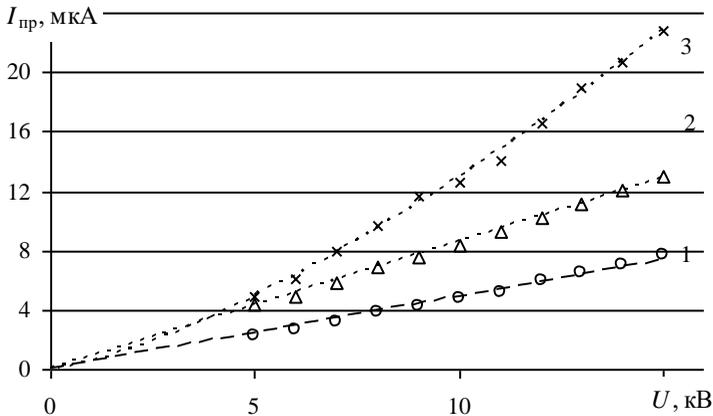


Рис. 57. Графики зависимости приведенного значения тока с пульверизатора для дистиллированной воды (1) при фиксированной 4 %-концентрации солевого раствора (2) и мыльного раствора (3). Соответствующие уравнения трендовых линий и коэффициентов аппроксимации, как показателей достоверности: $I = 0,85U$ $R^2 = 0,998$, $I = 0,49U$ $R^2 = 0,986$, $I = 0,51U^{1,4}$ $R^2 = 0,997$

По сравнению с дистиллированной водой использование солевого раствора дает увеличение тока в 1,5 – 2 раза, а мыльного раствора – 2,5 – 3 раза. В первом случае – за счет увеличения электропроводимости жидкости, во втором – за счет уменьшения размеров капель и общего увеличения их числа как носителей электрического заряда при фиксированном расходе жидкости. При этом зависимость $I(U)$ теряет линейную форму, обретая степенной вид (рис. 57, график 3).

Расчетные (ожидаемые) значения конвекционного тока $I = dq/dt = (\epsilon_0 \phi Q_{\text{пр}} \langle r \rangle) / (\langle r^2 \rangle \delta \rho)$ (см. выше), превышают полученные экспериментальные значения почти на два порядка. Связано это с принятыми равными значениями среднеквадратичного и среднего значений радиуса капли 30 мкм [179]. С одной стороны это не может обеспечить выполнение принятого неравенства $r \gg \delta$, а с другой, при большом разбросе значений радиусов очень сомнительно в части предположения, что все частицы несут одинаковый по величине электрический потенциал, снятый с насадка пульверизатора [166, 179]. Указывая на грубость оценочных предположений, например, в части требования выполнения неравенства $r \gg \delta$, тем не менее сохраняем огромный запас нереализованных возможностей для достижения величин максимального предельного тока.

Электризация нагретой струи ТУМV. Модели механизма генерации и электризации водно-капельного и водно-пузырькового аэрозоля делают привлекательными их использование при работе системы генерирования водяного тумана и транспортировки его в тепловую струю метеотрона в реальных полевых условиях. С одной стороны обе «сухие» струи продуктов сгорания метеотрона и турбореактивного двигателя (ТРД) также несут отрицательные электрические заряды [74, 141]. С другой стороны интенсивное дробление и испарение воды в струе ТРД и последующее «мгновенное» испарение нагретого капельного аэрозоля при встрече с радиационным потоком пламени приводит к резкому и быстрому подъему малых частиц водяного пара по вертикали с сохранением электрического заряда и увеличением потенциала каждой частицы.

Введение водно-капельного аэрозоля в факел метеотрона должно с одной стороны ухудшать процессы перемешивания и сгорания, а с другой – обеспечивать восходящий нагретый поток продуктов сгорания парами воды. В таком случае следует ожидать, что струя, насыщенная частицами сажи и воды, приобретет большую массу и инерционность. Этот факт подтвержден смещением максимума спектра вариаций напряженности локального электрического поля в сторону более низких частот (см. рис. 32, 33).

В полевых условиях получение разности потенциалов несколько десятков киловольт и расхода капель воды до килограмма в секунду не представляет больших сложностей [166]. Электростатический генератор на каплях воды способен обеспечить в струе метеотрона конвекционный ток 30 мА (при $U = 30$ кВ и расходе 300 г/с), а при более тонком распылении (или испарении) – на порядок выше [13]. Среднее расчетное значение подвижности носителей, образующихся в приведенных опытах, при потенциале пульверизатора 10^4 В оказывается около $3 \cdot 10^{-5}$ м²/В·с. При такой подвижности и средней скорости восходящего нагретого потока струи метеотрона единицы метров в секунду могут быть достигнуты напряжения электрического поля порядка 10^5 В/м. Вовлечение быстрой пароводяной струи в более медленную струю нагретых продуктов сгорания сопровождается появлением и гидратацией частиц дисперсной фазы нагретых жестких частиц (например, сажевых) с электризацией последних и формированием электростатического генератора на сажевых частицах. Конвекционный ток пропорционален числу носителей зарядов одного знака, поэтому при переходе к реальной установке с расходом воды до 100 л/с при сохранении разности потенциалов 10^4 В и эффективности зарядки, следует ожидать резкого увеличения концентрации носителей и получения величин токов до нескольких единиц Ампер [13]. Принципиально это выполнимо. Требуется лишь создать механизм эффективного вовлечения полевого электростатического генератора на каплях, пузырьках и частицах в радиационный конус или струю на активном участке метеотрона.

Механизм формирования полевого электростатического генератора на каплях или пузырьках разработан, осуществлен на модели и натуре. Область его внедрения известна: радиационный конус (лучше) или струю на активном участке (хуже) метеотрона. Таким образом, чтобы генератор стал эффективным необходимо его доделать, а именно: создать такое относительное расположение потоков, чтобы механизм вовлечения паровоздушной струи активным участком струи метеотрона стал эффективным, т.е. с минимальными потерями и большой водностью и с обязательным сохранением положительной плавучести струи или термика.

Электрическое поле Земли определено унитарной и локальной составляющими напряженности [65]. Генераторами унитарной составляющей являются протяженные слои ионосферы, поэтому ее вариации наполняют левую границу крайне-низкочастотного диапазона спектра плотности мощности. СПМ вариаций естественной локальной составляющей напряженности электрического поля следует ожидать смещенным к правой границе. Воздействовать на унитарную и локальную электрическую составляющую можно, соответственно влиянием на ионосферу низкочастотными звуковыми волнами и на нижние слои атмосферы в части перераспределения положительного пространственного заряда [65] искусственным локальным электрическим полем с известными характеристиками. Для этой цели пробовалась к использованию протяженная электрически заряженная нагретая струя метеотрона [1, 2, 13]. Нагретая электрически заряженная струя и тепловая колонка с вертикальной протяженностью до 1,5 км, с мягким закреплением одного конца на факеле пламени генерируют собственные продольные и поперечные газодинамические колебания, обязывающие вызывать как возмущения локального электрического поля в КНЧ диапазоне, выделяемым в форме роста дисперсии напряженности (см. ранее) [3, 13], так и влиять ростом на местное локальное электрическое поле. Если первое влияние объясняется сильно турбулентным источником, то второе – может быть как прямым, так и косвенным, индуцированным посредством пограничного аэрозоля.

IV. Физические модели и количественные оценки

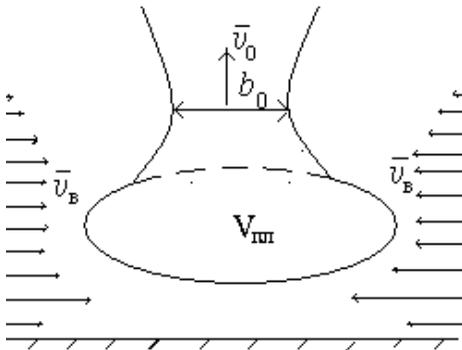
IV.1. Газодинамическая модель нагретой струи метеотрона

Динамические характеристики нагретой вертикальной струи. Развитие вертикальной нагретой струи от источника с мощностью тепловыделения $4 \cdot 10^8$ Вт соответствует по масштабу мезометеорологическим процессам, отвечающим за микроклимат.

Величину критерия режима конвекции оцениваем в форме локального аналога числа Фруда [14, 138, 199] по данным кинографирования:

$Fr_0 = 0,1 \cdot \frac{v_0^2}{\tau_0} \cdot \frac{T_{\infty 0} b_0}{g}$, где v_0 , τ_0 – осевые скорость и перегрев от-

носительно температуры окружающей среды $T_{\infty 0}$ в начальном («0») сечении струи. Для $v_0 = 30$ м/с, $\tau_0 = 2 \cdot 10^3$ К, $T_{\infty 0} = 300$ К, $D_0 = 2b_0 = 6$ м, $Fr_0 < 10$, что подтверждает ожидаемый естественно-



конвекционный режим развития нагретой струи (рис. 58).

По почти одинаковым порядкам величин сил плавучести и инерции пренебрегать ни одной из них нельзя. Поэтому нежелательно пользоваться всеми упрощениями Буссинеска [138]. Однако из их совокупности можно принять следующее:

Рис. 58. Газодинамическая схема объема пламени $V_{пл}$ и начального сечения струи: D_0 – диаметр начального сечения струи, v_0 – вертикальная средняя по расходу скорость продуктов сгорания, $v_в$ – проекции горизонтальных составляющих векторов скоростей воздушных масс

излучением и поглощением газом лучистой энергии можно пренебречь. Так по оценке Мортонна для струи с $v_0 = 20$ м/с,

$\tau_0 = 2 \cdot 10^3$ К, $T_{\infty 0} = 300$ К ошибка в расчете высоты подъема струи не превышает 2 % и уменьшается с увеличением v_0 .

Критерий Россби, характеризующий отношение сил инерции и Кориолиса составляет $Ro = \frac{v_{0\perp}}{2\Omega H_{\max\perp}} = 10^4$, при принятой скорости вращения Земли $\Omega = 10^{-4}$ рад/с, индекс « \perp » указывает, что масштабы скорости и длины струи берутся в плоскости перпендикулярной земной оси [138]. Понятно, что сила Кориолиса для системы отсчета жестко связанной с Землей пренебрежимо мала.

При небольших скоростях струи ($v_0 = 30$ м/с) рассматривается высокотемпературный участок струи стационарного теплового источника малых размеров. Решениями модели должны быть следующие функции от высоты по оси $0z$: $v(z)$; $b(z)$; H_{\max} ; $\frac{\rho_1 - \rho}{\rho}(z)$.

Модель Мортон – Тейлора – Турнера (МТТ). Исходными дифференциальными уравнениями модели МТТ естественно-конвекционных режимов струйных течений [14, 200, 201] являются уравнения сохранения объема (массы), импульса и перепада плотности (как эквивалента относительного перегрева струи). Система уравнений представлена в авторских формах и обозначениях [14]:

$$\frac{d}{dz}(b^2 \omega) = 2 \cdot \alpha \cdot b \cdot \bar{\omega}; \quad \frac{d}{dz}(b^2 \omega) = b^2 \cdot g \cdot \frac{\rho_0 - \rho}{\rho}$$

$$\frac{d}{dz}(b^2 \cdot \bar{\omega} \cdot g \cdot \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_1}) = b^2 \cdot \bar{\omega} \cdot \frac{g}{\rho_1} \cdot \frac{d\rho_0}{dz},$$

где b – радиус струи; $\bar{\omega}$ – вертикальная средняя по расходу скорость струи в заданном сечении, α – константа вовлечения, равная отношению горизонтальной скорости потока на границе струи к вертикальной, ρ_0, ρ_1 – плотности среды на уровне источника и по струе, соответственно, ρ – плотность струи.

При небольшом начальном радиусе можно положить струю не протяженной, и стратификацию атмосферы по высоте конвективной колонки, не учитывая ($\rho = \text{const}$). (Модель о учетом стратификации дана в [138].

Тогда: $\frac{d\rho_0}{dz} \rightarrow 0$ и $b^2\omega g \cdot \frac{\rho_1 - \rho}{\rho_1} = Q = \text{const.}$

Пренебрегая турбулентными пульсациями плотности вдоль вертикальной оси Oz авторы [14] получали:

$$b\omega = (0,9\alpha Q)^{1/3} z^{2/3}; \quad b^2\omega = \frac{6d}{5} \cdot (0,9 \cdot \alpha \cdot Q)^{1/3} Z^{5/3}$$

$$\text{Тогда } b = \frac{6d}{5} z; \quad \omega = \frac{6d}{5} \cdot (0,9 \cdot \alpha \cdot Q)^{1/3} \cdot Z^{-1/3}$$

$$\text{и } g \cdot \frac{\rho_1 - \rho}{\rho_1} = \frac{5Q}{6\alpha} \cdot (0,9 \cdot \alpha \cdot Q)^{-1/3} \cdot Z^{-5/3}.$$

Оценим положение z_0 виртуального точечного источника. Так как $Fr \approx 1$, то $b(z)/z = \text{const}$, или $b = \frac{6\alpha}{5} z$, где рекомендуемое значение $\alpha = 0,08$ [14, 138].

При начальном диаметре струи $D_0 = 12$ м, получаем $z_0 = 60$ м (область автомодельного решения). А из условия $Q = \text{const}$, и на уровне реального источника при $b_0 = 6$ м, $v_0 = 30$ м/с, $\rho_1 = 1,3$ кг/м³, $\rho = 0,15$ кг/м³, определим $Q = 10^4$ м³/с. Тогда

$$v = 45z^{-1/3};$$

$$\frac{\rho_1 - \rho}{\rho_1} \cong 10^3 \cdot z^{-5/3}.$$

Вблизи высоты $z \approx H_{\text{max}}$ в слое Δz струя резко расширяется («разворачивается»). Здесь силы плавучести начинают превалировать и превосходить силу турбулентного трения, причем превосходство отрицательной силы плавучести над силой инерции сказывается в очень быстром затухании вертикальной скорости струи ($Fr \ll 1$) [138]. Последующий участок струи уже не является высокотемпературным и учет стратификации необходим.

Авторы [14] предлагают решение H_{max} для струи от точечного источника в стандартной атмосфере с температурой окружающей среды 288К и температурным градиентом $\gamma = \frac{dT}{dz} = 6,5$ град/км:

1. Для источника постоянной мощности P_1 , кВт: $z_1 = 46(P_1)^{1/4}$
2. Для источника переменной мощности: $z_2 = 1,87(P_2)^{1/4}$,

При работе метеотрона на постоянном режиме расхода топлива: $P_1 = 4 \cdot 10^5$ кВт, $z_1 = H_{\max} = 1150$ м, и с учетом z_0 : $H_{\max} = 10^3$ м.

Автор [199] предлагает считать под высотой начала «разворачивания» тепловой струи, высоту на которой пропадает потенциальное ядро. Рассматривая неточечный тепловой источник и

определяя зависимость: $\int_0^{t_2} \omega_0(t) dt = \int_0^{H_0} (Az^3 + 1) dz$, где H_0 – высота

начала «разворачивания», A – постоянная задачи зависит от режима работы и исходных данных.

Автор [199] показывает, что на определенной высоте H_0 , единицей в скобке под правым интегралом можно пренебречь, что указывает на автомодельность решения задачи как от точечного источника. Таким образом, именно на этой высоте H_0 пропадает потенциальное ядро струи и струя может начать разворачиваться. Расчет по данным рассматриваемой задачи, показал, что $H = 150$ м от начального сечения струи. Однако облеты тепловой струи метеотрона на вертолете МИ-2 осенью 1982 года при устойчивой атмосфере [2], показал, что на высотах 400 – 500 м над поверхностью земли имеют место значительные восходящие потоки. Поэтому, для данной работы принимаем модель МТТ.

Средняя скорость струи в «прямоугольном профиле» на высоте $H_{\max} = 1150$ м составляет $\bar{\omega} = \frac{45}{z^{1/3}} \approx 4,2$ м/с, а относительный

перепад плотности: $\frac{\rho_1 - \rho}{\rho_1} \approx 10^3 z^{-5/3} \approx 10^{-2}$, или $\frac{\tau_{H_{\max}}}{T_{\infty H_{\max}}} \approx 10^{-2}$

при $T_{\infty H_{\max}} = 280\text{К}$. Тогда $\Delta\rho/\rho_1$ соответствует перегрев струи $\Delta t \approx 2,8$ градуса на высоте H_{\max} . При работе метеотрона эти величины не реальны на высоте H_{\max} . Они получены в результате неучета

стратификации атмосферы при получении $\omega(z)$ и $\Delta\rho(z)/\rho_1$ с одной стороны, и определением H_{\max} для $\gamma = \frac{dT}{dz} = 6,5$ град/км, с другой.

$$\text{При этом } (\tau_{H_{\max}} = 6,5 \text{ град}): \frac{\Delta\rho}{\rho_1} \cong \frac{\Delta\tau_H}{T_{\infty H}} \approx 2 \cdot 10^{-2}.$$

Тогда получаем $H_{\max} = 8 \cdot 10^2$ м, т.е. меньше, чем $H_{\max} = 1150$ м.

Автор [138] также использует функцию вида:

$\omega(z) = A(B \cdot z)^{-n/m}$ для автомодельных решений, но при $n/m = 6$, что, вероятно, ближе к реальному тепловому источнику.

Модель Качурина. Модель нагретой вертикальной струи, построенная на обобщении второго закона Ньютона и обобщения закона сохранения теплосодержания при двух допущениях: 1. Известно распределение температуры и скорости в струе в любом по высоте горизонтальном сечении; 2. Величина вертикальной скорости ветра в окружающей среде пренебрежимо меньше величины вертикальной скорости в струе на активном участке.

Основываясь на данных [199], автор [5] приходит к четырем уравнениям с четырьмя неизвестными параметрами $\omega(z)$, $T(z)$, $q(z)$, $b(z)$, представляющих в принятых обозначениях модель:

$$\frac{2}{b} \cdot \frac{db}{dz} = \frac{\alpha}{b} \cdot \frac{T}{T_0} - \frac{1}{\omega} \cdot \frac{d\omega}{dz} + \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{dz} + \frac{Mq}{RT}$$

$$\frac{1}{\omega} \cdot \frac{d\omega}{dz} = \frac{q}{\omega^2} \cdot \frac{T - T_0}{T_0} - \frac{\alpha}{b} \cdot \frac{T}{T_0}$$

$$-\frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{dz} = \frac{\alpha}{b} \cdot \frac{T - T_0}{T} - \frac{q}{C_p T_0}$$

$$-\frac{1}{q - q_0} \cdot \frac{dq}{dz} = \frac{\alpha}{b} \cdot \frac{T}{T_0}$$

где: q – теплосодержание, C_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Данная система дифференциальных нелинейных уравнений первого порядка решается численными методами. При расчете автором [5] принималось $\alpha = 0,22$.

При деформации струи, в результате ветрового сдвига, использовались аппроксимации сечения струи перпендикулярно ее оси, кругом, а эквивалентного горизонтального сечения – эллипсом.

При этом отношение α/b менялось на $\frac{\alpha}{b(1 + v_r/\omega)^{1/2}}$ где v_r – горизонтальная составляющая вектора скорости I струи.

Отмечено, что повышение начального перегрева струи $\Delta T = T - T_1$ увеличивает архимедово ускорение, при этом кинетическая энергия струи, пропорциональная плотности уменьшается. В зависимости от соотношения начальных параметров струи это обстоятельство может привести и к росту и к падению ее высоты подъема. В результате струя может дополнительно разогнаться:

$$\frac{d}{dT} \cdot \left(\frac{d\omega}{dz} \right) > 0 \text{ или тормозиться } \frac{d}{dT} \cdot \left(\frac{d\omega}{dz} \right) < 0.$$

Условие перехода от одного режима к другому, можно определить, если в предпоследнем уравнении левую часть приравнять нулю: $\frac{d}{dT} \cdot \left(\frac{d\omega}{dz} \right) = 0$. Тогда для вертикальной струи ($v_r = 0$):

$$\frac{d}{dT} \cdot \left[\frac{1}{\omega} \cdot \frac{d\omega}{dz} \right] = \frac{g}{\omega^2 T} - \frac{\alpha}{bT} = 0, \text{ или } \omega^2/b = g/\alpha.$$

Далее показано, что $\alpha = 0,1 - 0,08$, и $\omega^2/b \cong 120 \text{ м/с}^2$. При работе метеотрона на основном режиме: $\omega = 30 \text{ м/с}$, $b = 8 \text{ м}$, отношение $\omega^2/b \cong 120 \text{ м/с}^2$ является и оптимальным с точки зрения получения максимального размера нагретой струи.

Окончательно, принимаем модельные функциональные зависимости для источника постоянной (1) и переменной (2) мощности:

1 а) высокотемпературный участок тепловой струи ($H_{\max} = 150 - 200 \text{ м}$): $\omega(z) = 45z^{-1/3}$; $\Delta\rho/\rho_1 \approx 10^3 \cdot z^{-5/3}$;

$$1 \text{ б) } H_{\max} > 200 \text{ м: } \omega(z) \approx \frac{\omega_n}{(3 \cdot 10^{-6} z^3 + 1)} \approx \frac{\omega_n}{3 \cdot 10^{-6} z^6};$$

$$\text{при } \rho \approx \rho_n \cdot \frac{H_{\max}}{100} \text{ имеем } H_{\max} = 46(P_1)^{1/4}.$$

$$2. \omega(z) \approx \frac{\omega_n}{(1,5 \cdot 10^{-5} z^3 + 1)},$$

$$\text{при } \rho = \rho_n \cdot \frac{H_{\max}}{20} \text{ имеем } H_{\max} = 1,87 \cdot (P_2)^{1/4}.$$

В качестве необходимых пояснений, следует вспомнить «вихревую модель» осесимметричной нагретой струи метеотрона [2, 200]. Движение воздуха в естественно-конвективных нагретых струях сопровождается непрерывной генерацией и последовательным взаимодействием пузырей, вихревых макроструктур и следов [140, 149]. Пузыри имеют размер до десятков метров и представляют собой плавающие термики, устойчивые к поперечному сдвигу ветровой нагрузки и способные автономно перемещаться на значительные расстояния. Вероятно, затопленные осесимметричные струи могут быть представлены их суперпозицией [2, 90 – 92]. Струю на активном участке можно рассматривать как суперпозицию когерентных структур в форме вихревых колец [2, 202].

IV. 2. Моделирование аддитивных факторов влияния на E_z - составляющую электромагнитного поля вблизи факела пламени и струи метеотрона

Факторы влияния ТУМ. При работе ТУМV нагретая струя может быть представлена пятью системно-динамическими качественными участками: сформировавшийся составной факел пламени (очаг), активный и пассивный участки, рефракционный конус (тепловая колонка), натекающий из окружающего пространства прогретый воздух. Большие массы продуктов сгорания выносятся из приграничного слоя на уровни границ пограничного слоя 0,3 – 1 км (в зависимости от метеоусловий), обретая признаки конвекционного электростатического генератора [2, 11, 74, 113] с наложенными

турбулентными флуктуациями. Вследствие непрерывного вертикального выноса больших масс из локализованного относительно малого объема возникают радиально направленные к очагу пламени перемещения среды в приграничном слое. В зависимости от метеоусловий перемещающаяся среда может содержать в той или иной мере капельки воды, необожженные и обожженные пылевые частицы, которые являются надежными аккумуляторами и транспортерами ионов разных знаков. В очаг пламени и струю вовлекается окружающий воздух, что приводит к смещению аэрозоля, сильно подверженного вариациям метеоусловий: пульсации вектора скорости ветра, влажности воздуха, вертикального перераспределения фракций аэрозоля и т.д. Изменение зарядовой обстановки в области приемной антенны может быть объяснено горизонтальными и вертикальными перемещениями среды, которые следует рассматривать продольными и поперечными механическими волновыми процессами, соответственно [203].

Суммарная ЭДС в системе «факел пламени – струя нагретых продуктов сгорания» формируется исходными механизмами разделения электрических зарядов в пространстве системы (см. выше). Назовем некоторые из них еще раз:

- трибоэлектрическое разделение при высокоскоростном контактом истечении топлива из форсунок;
- диспергирование топлива скоростным напором с разделением капель по размеру: крупные – на периферию;
- седиментация крупных капель в поле тяготения Земли;
- формирование и вертикальный перенос заряженных нагретых сажевых частиц.

Суммарным эффектом является обретение пламенем и нагретой струей отрицательного электрического заряда [17, 74, 114]. Флуктуации напряженности электрического поля, связаны с флуктуациями электрических и газодинамических параметров струи и окружающего приемную антенну пространства [203].

Модель «заряженного листа». Рассмотрим электрокинетiku возникновения ЭДС на приемной антенне, с учетом фактов:

- используемый приемный блок, в соответствии со своей амплитудно-частотной характеристикой наиболее чувствителен к интервалу частот 1 – 20 Гц [1];

- датчик приемной антенны чувствует не сами физические величины, а скорости их изменений, поэтому регистратор пишет динамические параметры реальных процессов.

- приемная антенна является вертикальным несимметричным диполем и находится на расстоянии $\sim 5R$ от центра факела – шара, который, в свою очередь, приподнят над плоскостью эффективного сечения антенны на высоту $\sim 1,5R$.

Рассмотрим поведение естественного электрически нейтрального приземного слоя аэрозоля, содержащего распределенный по вертикали электрический заряд разного знака и величины в зависимости от характеристик транспорта электрического заряда разного знака: дисперсности и состава фракций [119, 156].

Вблизи восходящей турбулентной струи метеотрона этот слой будет испытывать газодинамическое воздействие, определяемое режимом работы ТУМ на фоне ветровой обстановки. Поляризованный приземный слой грубодисперсной фракции [2, 119, 156, 204] обеспечивает скачок электропроводимости на высоте до 1 метра и, следовательно, его следует описать, рассматривая, в соответствии с теоремой Гаусса заряженный лист (ЗЛ) с заданной поверхностной плотностью зарядов и с электрическим отображением.

Газодинамическое воздействие на структуру и «геометрию» слоя меняет и плечо формируемого диполя: «заряженный лист – отображение» также как и порывы ветра влияют на вектор поляризации в объеме слоя вариативным изменением высоты диполя «бегающей волной», изменением производительности источника некомпенсированных зарядов, при смене режима работы пары «поверхность – поток» и кластерных динамик поляризованных группировок заряженных частиц в неоднородном и не изотропном поле действия локальной турбулентности.

При среднем времени жизни некомпенсированных зарядов на частице пыли до 5 – 10 минут [205] при экспериментальных значе-

ниях скорости ветра 1 – 3 м/с на высотах 1 – 2 м над поверхностью позволяет ожидать существенную электрическую неоднородность поля слоя на значительных расстояниях.

На установившемся стационарном режиме работы метеотрона вектор скорости среды меняет свое направление с условно радиального на спиральное с появлением и монотонным развитием тангенциальной составляющей. Устанавливается циркуляция вектора скорости среды и флуктуации этого вектора принимаются незначительными. При аппроксимации аэрозольного слоя «ЗЛ – отображение» принимаем, что при действии ветра по ЗЛ бежит направленная механическая волна с собственным периодом циркуляции. Оценим скорость изменения E_z -составляющей поля в точке приема внутри этого слоя. При относительно небольших величинах скорости принимаем слой стационарно однородным ($\varepsilon(\vec{r}, \vec{z}, t) = \text{const}$). Этот слой можно даже увидеть при определенных условиях: летом при восходе солнца он начинает формироваться и разделяет грубодисперсную фракцию и мелкодисперсную. Соответственно по знаку подразделяются и электрические свободные заряды на аэрозольных и пылевых частицах соответствующих фракций по вертикали [119, 156]. На этом слое происходит скачок потенциала [2].

За исходные уравнения примем третье и четвертое уравнения Максвелла: $\text{rot}\vec{H} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} + \vec{j}$ и $\text{div}\vec{D} = \rho_e$, где ρ_e – объемная плотность свободных заряженных частиц на частицах аэрозоля.

Плотности конвекционного тока и электрического заряда аэрозоля выражаются через вектор поляризации $\vec{P}(\vec{r}, t)$:

$$\vec{j} = \frac{\partial\vec{P}}{\partial t}; \quad \rho_e = -\text{div}\vec{P}; \quad \vec{D} = \varepsilon\vec{E} + \vec{P}.$$

При $\text{rot}\vec{H} = 0$, имеем $\frac{\partial\vec{D}}{\partial t} = -\frac{\partial\vec{P}}{\partial t}$; $\nabla\vec{E} = -\frac{2}{\varepsilon}\nabla\vec{P}$

или: $\varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial\vec{P}}{\partial t} = -\frac{\partial\vec{P}}{\partial t}$; $\nabla\vec{E} = -\frac{2}{\varepsilon}\nabla\vec{P}$.

Тогда исходная система двух уравнений принимает вид:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{2}{\varepsilon} \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}; \quad \nabla \vec{E} = -\frac{2}{\varepsilon} \nabla \vec{P}.$$

Для выбранной модели $\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{V} = \rho_e 2h$, где $2h$ – плечо диполя

поля h – высота ЗЛ над поверхностью земли. Тогда

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{4}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \rho_e}{\partial t} \vec{h} + \frac{\partial \vec{h}}{\partial t} \rho_e \right)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial z} = -\frac{2}{\varepsilon} \frac{\partial \vec{P}}{\partial z}; \quad \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = -\frac{2}{\varepsilon} \frac{\partial \vec{P}}{\partial x}; \quad \frac{\partial \vec{E}}{\partial y} = -\frac{2}{\varepsilon} \frac{\partial \vec{P}}{\partial y}$$

Для вертикального несимметричного диполя безразлично направление ветра в плоскости листа, поэтому:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{\partial z}{\partial t} \frac{4}{\varepsilon} \left(\frac{\partial (\rho_{ey} \vec{h})}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{\partial r}{\partial t} \frac{4}{\varepsilon} \left(\frac{\partial (\rho_{ey} \vec{h})}{\partial r} \right), \quad (1)$$

или:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \left(4v_z \vec{h} \frac{\partial \rho_e}{\partial z} + 4v_z \rho_e \frac{\partial \vec{h}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \left(4v_r \vec{h} \frac{\partial \rho_e}{\partial r} + 4v_r \rho_e \frac{\partial \vec{h}}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Логично считать, что горизонтальная скорость при ветре с указанными выше скоростями существенно больше вертикальной, поэтому в дальнейшем будем в качестве второго уравнения рассматривать лишь последнее уравнение системы (2). В частном случае, принимая $\rho_e(\vec{r}, \vec{z}, t) = \text{пост.}$, что допустимо предположить при слабом и плавном изменении скорости ветра, перепишем:

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = -4 \frac{\rho_e}{\varepsilon} \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = -4 \frac{\nu_r \rho_e}{\varepsilon} \frac{\partial h}{\partial t}$$

При рассмотрении вертикальных перемещений среды в области приемной антенны используем «модель ЗЛ». Вертикальные перемещения среды моделируются изменением высоты плеча диполя – «бегущей» по ЗЛ волной. Изменение зарядовой обстановки в области приемной антенны может представлено двумя механизмами: «протяжкой» плоского ЗЛ с заданным метеоусловиями распределением поверхностной плотности зарядов (на эффективной высоте антенны); «протяжкой» деформированного ЗЛ с однородным распределением поверхностной плотности зарядов (см. систему уравнений (1)). Перепишем систему уравнений (1) в виде:

$$\frac{dE}{dt} = -4 \frac{\nu_z}{\varepsilon} \left[\frac{d(\rho_e h)}{dz} \right];$$

$$\frac{dE}{dt} = -4 \frac{\nu_r}{\varepsilon} \left[\frac{d(\rho_e h)}{dr} \right]; \quad (3)$$

где h – текущая высота заряженного листа относительно эффективной высоты датчика приемной антенны.

Принимая, инициируемую в цепи приемной антенны ЭДС пропорциональной $\frac{\partial E_z}{\partial t}$, получим:

$$\text{ЭДС} \propto \begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial t} = -\frac{4\rho_e}{\varepsilon} \frac{\partial h}{\partial t} \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} = -4 \frac{\nu_r \rho_e}{\varepsilon} \frac{\partial h}{\partial t} \end{cases} \quad (4)$$

Оба уравнения (4) описывают возникновение $\frac{\partial E_z}{\partial t}$, связанное с динамикой сдвижки вертикального распределения заряда по

высоте ЗЛ относительно условной точки приема (эффективной высоты антенны). Высота ЗЛ в точке приема может меняться за счет двух типов сдвиговых перемещений. Первое уравнение описывает изменение h при вертикальном смещении воздушных масс, несущих заряженные частицы пыли; второе – высоту ЗЛ в точке приема при горизонтальном перемещении со скоростью v_r , если он не параллелен поверхности земли.

Величина h и ее производные из уравнений (4) являются функциями многих аргументов естественной природы (метеосостояние, ветровая турбулентность, состояние подстилающей поверхности и т.д.), представляемые случайными процессами. Таким образом, естественные изменения h в точке приема должны быть представлены суммарным случайным процессом, а инициируемая в приемной антенне ЭДС должна иметь шумовой характер с выраженным фактором на около-нулевых частотах.

В малой области приема процесс формирования E_z -составляющей электрического поля фактора аэрозоля заряженных частиц приземного слоя определяется шумом естественных процессов и искусственным детерминированным процессом стока воздуха в объем пламени метеотрона. Характер искусственного процесса преимущественно определяется управляемым режимом работы метеотрона [1, 2].

Электрогидродинамическая модель. На процесс формирования E_z -составляющей, кроме описанных макропараметров кинетики аэрозольного слоя, должны влиять подвижность заряженных частиц, степень ионизации, электропроводность. Кроме этого учтем в модели ЗЛ [204] зависимость $\frac{\partial E_z}{\partial t}$ от величины дивергенции горизонтальной стока векторного E -поля и скорости заряженных частиц. Оценим при простейших условиях величину дивергенции.

Пусть имеем поток слабо проводящей среды с небольшим количеством заряженных частиц. Рассмотрим простейший модельный случай наличия в потоке нейтральных молекул, связанных заряженных частиц одного сорта i , полагая, что их количество N_i опре-

деляет избыточный заряд потока. Если их скорость относительно

среды: $\vec{v}_{\text{отн}} = \frac{\sum_i^N \vec{v}_{i\text{отн}}}{N_i}$, то плотность конвекционного тока в си-

стеме координат сред: $\vec{j} = \rho_e \vec{v}_{\text{отн}}$.

В неподвижной системе координат: $\vec{j} = \rho_e \vec{v}_r + \rho_e \vec{v}_{\text{отн}}$ или:

$$\vec{j} = \rho_e \vec{v}_r + \rho_e b (\vec{E}_3 + \vec{E}_0), \quad (5)$$

где: $\rho_e = n_i |e|$; $\rho_e b = \sigma$; \vec{E}_3 – вектор напряженности электрического поля Земли; \vec{E}_0 – вектор напряженности поля приземного аэрозоля; σ – электропроводность приземного слоя аэрозоля; b – коэффициент подвижности зарядов.

Дивергенция слагаемых векторов последнего уравнения:

$$\text{div} \vec{j} = \text{div} [\rho_e b (\vec{E}_3 + \vec{E}_0)] + \text{div} \rho_e \vec{v}_r.$$

Исключаем сильные порывы ветра и рассматриваем медленные (с большим периодом) и небольшие по амплитуде изменения скорости ветра. В таком случае $\rho_e(\vec{r})$ и $b(\vec{r})$ можно считать постоянными; $\rho_e(z)$ и $b(z)$ также можно принять постоянными, так как при данном предположении антенна по своей высоте усредняет локальные изменения $\rho_e(z)$ и $b(z)$.

Учитывая вид АЧХ приемной системы на около-нулевых частотах [1] и полагая электрическое поле Земли квазиэлектростатическим в рамках интервалов локальных измерений [206], принимаем $\text{div} \vec{E}_3 \cong 0$, и получаем: $\text{div} \vec{j} = \rho_e b \text{div} \vec{E}_0 + \rho_e \text{div} \vec{v}_r$

Суммарный вектор скорости $\vec{v}_z(t)$ является векторной суммой двух составляющих: естественной ветровой \vec{v}_{rB} и метеотронной \vec{v}_{rM} . Эффективная высота антенны около 1 м от поверхности земли, где концентрация грубодисперсной фракции приземного аэрозоля еще велика [119, 156]. Поэтому величина коэффициента подвижности заряженных частиц (частиц аэрозоля) мала и электри-

число $Re = \frac{v_r}{bE}$ также будет мало. Это означает, что заряды заморожены в среду и движутся вместе с ней со скоростью v_r .

Совокупность перечисленных возможных аргументов искомой функции $\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial t}$ указывает, что предполагаемый механизм может иметь приближение электрогидродинамической модели с системой уравнений [207] электрогидродинамики (ЭГД) для плоского потока несжимаемой жидкости движущегося в бескоординатной системе в направлении \vec{r} , без учета вязкости и теплопроводности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{dv_r}{dr} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{dv_r}{dr} = \rho_e E_0 - \frac{dp}{dr} \quad (7)$$

$$\frac{dE_0}{dr} = \frac{\rho_e}{\varepsilon} \quad (8)$$

$$-\frac{d\rho_e}{dt} + \frac{dj}{dr} = 0 \quad (9)$$

$$j_r = \rho_e bE_0 + \rho_e v_r \quad (10)$$

Уравнение (8) системы перепишем в виде:

$$\frac{dE_0}{dt} = v_r \frac{\rho_e}{\varepsilon} \quad (11)$$

Из закона сохранения электрического заряда (уравнение 9):

$$\frac{dj}{dt} = v_r \frac{d\rho_e}{dt} \quad (12)$$

Приведем к подобному виду и уравнение (10), а именно:

$$\frac{dj}{dt} = b\rho_e \frac{dE_0}{dt} + bE_0 \frac{d\rho_e}{dt} + v_r \frac{d\rho_e}{dt} + \rho_e \frac{dv_r}{dt}$$

С учетом (12), имеем:

$$b\rho_e \frac{dE_0}{dt} + bE_0 \frac{d\rho_e}{dt} + \rho_e \frac{dv_r}{dt} = 0 \quad (13)$$

Резонно полагая $\frac{\partial p}{\partial r} = 0$, имеем из уравнения (7):

$$\rho \frac{\partial v_r}{\partial t} = \rho_e E_0 \quad .$$

Тогда уравнение (13) перепишем:

$$b\rho_e \frac{\partial E_0}{\partial t} + bE_0 \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \rho_e^2 \frac{E_0}{\rho} = 0, \text{ или}$$

$$\frac{dE_0}{E_0} = -\frac{d\rho_e}{\rho_e} - \frac{\rho_e}{b\rho} dt \quad (14)$$

Уравнение (9) с учетом (8) и (10) перепишется:

$$\frac{d\rho_e}{dt} = \frac{\rho_e b}{\varepsilon} \rho_e + \rho_e \frac{dv_r}{dr}, \text{ или}$$

$$\frac{d\rho_e}{\rho_e} = \frac{\rho_e b}{\varepsilon} dt + \frac{dv_r}{v_r} \quad (15)$$

Решение функции $E_0(\rho_e, v_r)$ в малой области приема находится подставкой уравнения (15) в уравнение (14):

$$\frac{dE_0}{dt} = -E_0 \left[\frac{\sigma}{\varepsilon} + \frac{\alpha_e}{b} + \frac{1}{v_r} \frac{dv_r}{dt} \right], \text{ где } \alpha_e = \frac{\rho_e}{\rho}.$$

При сделанных предположениях о постоянстве значений функций: $\rho_e(z, r)$ и $b_i(z, r)$ последнее равенство можно записать в удобном для анализа виде:

$$\frac{dE_0}{dt} = E_0 \left[A + \frac{d(\ln v_r)}{dt} \right],$$

где при принятых ограничениях $A = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} + \frac{\alpha_e}{b_i} \right) = \text{const}$.

Величина и знак A , c^{-1} определяются в значительной степени размером частиц аэрозоля. Из $\frac{d(\ln E/v_r)}{dt} = A$ очевидно, что харак-

тер формирования E_z -составляющей по этому механизму подобен функции $v_r(t)$. Абстрагируясь от свойств аэрозоля ($A \rightarrow 0$) получаем качественную зависимость ЭДС приемной антенны от напряженности поля в слое и скорости изменения логарифма горизонтальной скорости потока. В таком случае при превалировании грубодисперсных фракций приемная антенна E -поля может служить датчиком упругих продольных волн, т.е. акустического излучения.

Сигнал с антенны не зависит от величины средней скорости горизонтального потока воздуха, однако зависит от скорости изменения (амплитуды) и фазовой изменчивости (вариабельности). Причем, чем больше период колебаний скорости, тем больше величина dE/dt в моменты времени, соответствующие экстремальным значениям скоростей. Тогда наиболее сильно данный механизм должен проявляться при уменьшении частоты модуляции производительности метеотрона. Кроме указанного эффекта, в интервале времени, равном задержке воспламенения увеличивается влажность вблизи установки и, следовательно, резко меняется электропроводность σ при росте ε и α_ε .

Авторы попытались представить качественный вид синхронной динамики радиуса $R(t)$ факела пламени, совмещенной с функцией давления подачи топлива на форсунки $\Delta p_\Phi(t)$ на переменном режиме работы ТУМV, E_z -составляющей напряженности электрического поля и движущейся среды с электропроводностью σ (рис. 59). Здесь существование пика В сомнительно, так как приращение σ (т. А) вероятно мало по сравнению с большой отрицательной величиной $\Delta \ln v_r$.

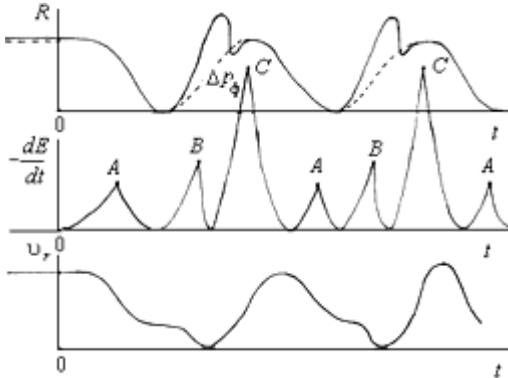


Рис. 59. Ожидаемый вид функций: $R(t)$, $-dE/dt$, $v_r(t)$ при заданном $\Delta p_\phi(t)$

Электростатическое поле пламени метеотрона. Очаг пламени, являясь постоянной структурной частью тепловой струи, не обладает собственной и постоянной во времени структурой. Первые 10 – 15 минут работы ТУМВ очаг пламени метеотрона сформирован перекрывающимися струйными факелами, равномерно распределенными вдоль прямой плиты. Визуально, очаг пламени выглядит вытянутым эллипсоидом вращения (бочки). По истечении указанного интервала времени цельность структуры очага разрушается, струйные факелы обособляются, ядро пламени распадается на струйно-форсуночные фрагменты.

Представим реальный факел пламени: 1. Электрически заряженной цилиндрической поверхностью протяженностью L , радиусом R_1 и поверхностной плотностью заряда σ ; 2. Шаром с эквивалентным радиусом $R_{\text{экв}}$, заполненным однородно электрическим зарядом с объемной плотностью ρ_e . На номинальном режиме работы по визуальной оценке объем светящейся области факела составляет $800 - 1000 \text{ м}^3$. Принимая по первой аппроксимации длину цилиндра $L = 7 \text{ м}$, получаем его радиус $R_1 = 6,0 - 6,6 \text{ м}$, и в пересчете на шар с эквивалентным по объему радиусом $R_{\text{экв}} = 5,8 - 6,2 \text{ м}$.

Применим формулу Гаусса $\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon} \int_V \rho dV$ к этим приближениям, получим в области приемной антенны для первого случая:

$$E = \frac{\rho R_1^2}{2\epsilon\epsilon_0 r}.$$

Для шарового объема пламени метеотрона с эквивалентным радиусом R , заполненным однородно электрическим зарядом плотностью ρ в точке приема:

$$E = \frac{\rho}{3\epsilon\epsilon_0} \frac{R_{\text{ЭКВ}}^3}{r^2}.$$

Очевидно, что чем больше глубина модуляции объема пламени, тем большую роль играет радиус R . И эффект шарового объема более должен сказываться вдали. В этом смысле, конечно, хотелось бы сравнить записи со стационарного вертикального несимметричного диполя «на болоте», на расстоянии 150 м от пламени с имеющимися записями такого же канала на расстоянии 25 м от кромки пламени (см. I.4.2. на с. 68). Такие записи есть, но нет уже времени для аналитической реализации. Вероятно, если книга 5 состоится авторы не забудут про этот «маленький вопрос».

Анализ перехода к функции тепловыделения или интенсивности горения по реализации переменного давления подачи топлива. Напомним некоторые известные характеристики ТУМВ. При полном и эффективном сгорании топлива ТС-1 на стационарном режиме работы ТУМВ мощность тепловыделения, как интегральная характеристика интенсивности горения: $N = \eta \dot{G} = 0,4 \cdot 10^9$ Вт, где теплотворная способность топлива $\eta = 43,2$ МДж/кг [1]. Массовый и объемный расход топлива $\dot{G} = \rho_T v(t) S = 8,8$ кг/с, $\dot{G} = v(t) S = 9,42$ л/с. Без учета гидродинамических потерь скорости течений топлива по трубопроводу большой плети $v_1(t) = 2,1$ м/с, малой – $v_2(t) = 1,2$ м/с, величина средней скорости $v(t) \cong \sqrt{\frac{2p(t)}{\rho_T}}$ на

форсунках $p = 10^7$, Н/м², $\rho_T \approx 0,8 \cdot 10^3$, кг/м³ составит около 160 м/с. Последние расчетные оценки приемлемы по величине и с учетом оговорок по потерям вполне удовлетворяют уравнению неразрывности течений при указанных выше соотношениях сечений 50:1 и 110:1 (см. с. 11).

Переменный режим давления подачи топлива на форсунки ТУМВ берет начало со стационарного номинального режима ($p_0 = 100$ атм) и реализуется в косинусоиду на диаграмме регистрационной записи. Это означает, что помимо амплитудной (энергетической) составляющей переменного давления дополнительно появляется фазовая (ритмическая) составляющая. Косинусоида (рис. 60) на диаграмме имеет характерные особенности: 1. В амплитудной части – реализуется в пределах 0 – 1 заданного относительного давления p/p_0 (рис. 2); 2. В фазовой части – сопряжена с процессом воспламенения паро-топливной смеси посредством интервала задержки.

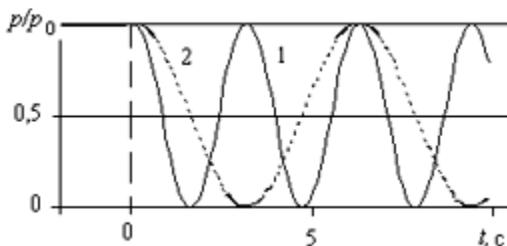


Рис. 60. К оценке давления подачи топлива: $1 - p/p_0 = \cos^2(\omega t)$, $2 - p/p_0 = [\cos(\omega t) + 1]/2 = \cos^2(\omega t/2)$

Учтем первую характерную особенность использованием тригонометрической зависимости $p(t) = p_0 \cos^2 \frac{\omega}{2} t$ (рис. 2) и далее:

$$v = \sqrt{2 \frac{p_0}{\rho_T} \cos^2 \frac{\omega}{2} t},$$

$$\dot{G} = \rho_T S \sqrt{2 \frac{p_0}{\rho_T} \cos^2 \frac{\omega}{2} t} = S \sqrt{2 p_0 \rho_T \cos^2 \frac{\omega}{2} t}$$

$$N = \eta \dot{G}; \quad N = A \sqrt{p_0 \cos^2 \frac{\omega}{2} t}, \quad N = A p_{t_0}^{1/2} \left| \cos \frac{\omega}{2} t \right|, \quad A = \eta S \sqrt{2 \rho_T} = \text{const.}$$

Заметим, что в начале и с течением времени формирования паро-топливной смеси ее плотность ρ_T падает приблизительно на

40%, а величина суммарного сечения возрастает на (10 – 15) % (см. выше), функционально компенсируя падение величины плотности. Далее, к утверждению $A = \text{const}$ вопросов не возникает.

Вторая характерная особенность имеет более сложные не очевидные последствия формирования открытого объемного процесса горения топлива и перехода на переменный режим работы ТУМВ. На этом режиме давление подачи топлива периодически достигает нулевой отметки (см. рис. 60), что указывает на гармонический процесс изменения давления. Динамика объема пламени поддерживается этим гармоническим процессом неоднозначно, с интервалом сдвижки по малому интервалу времени воспламенения и относительно большому интервалу времени формирования сплошного факела. Для определения интервала времени задержки воспламенения и интервала времени формирования сплошного факела были проведены опыты по синхронной регистрации давления подачи топлива на форсунки, физических полей и оптических (растровых) сигналов. При известном влиянии на генерацию локальных электрических и акустических полей в окружающей среде и в крайне-низком частотном диапазоне, резонно было предположить, что максимальный сигнал с растров, антенны и датчика инфразвукового давления определяется моментом времени максимума тепловыделений и объема факела пламени [2].

Оказалось, что на переменном режиме работы ТУМВ с увеличением частоты колебаний давления подачи топлива $p_{\phi}(t)$ уменьшается нормированное время запаздывания $\Delta\tau/T$ до минимума, сопровождающееся ростом до максимального ρ_{\max} коэффициента корреляции по кросскорреляционной функции $R_{E_{\text{pm}}}$ графических реализаций процессов $E_z(t)$ вертикальной E_z -составляющей напряженности электрического поля и давления $p_{\phi}(t)$ подачи топлива на форсунки горелочных устройств [3]. Обнаружено также, что функция задержки $\Delta\tau(f_m)$ от частоты f_m модуляции давления подачи топлива в диапазоне исследований 0,08 – 1 Гц имеет минимум 0,3 с, приходящийся на частоту 0,17 Гц (см. рис. 28, сс. 92 – 93).

При сделанных предположениях, очевидно, что функции тепловыделения и оптического растрового сигнала имеют одинаковую переменную временную задержку $\Delta\tau(f_m)$ относительно функции заданного гармонического изменения давления $p_\Phi(t)$ подачи топлива на входе в форсунки, что напрямую объясняется переменным временем задержки воспламенения. Однако, для объяснения задержки процесса генерации вариаций вертикальной E_z - составляющей напряженности этого оказывается недостаточно. В поиске истины обратимся к формам кросскорреляционных функций (ККФ) R_{Epm} для разных частот (см. рис. 27). На них видно, что до 0,2 Гц и после поляризация этих функций разная. Значит, при переходе через ранее определенный экстремум имеем смену знака корреляции [3].

При смене режима модуляции в интервале частот $\Delta f_m = 0,1 \div 0,3$ Гц источник генерации электрического поля меняет знак, что приводит к смене направления сопряжения рассматриваемых графических реализаций физических процессов, определенный, как эффект смены знака корреляции. Например, на частотах модуляции ниже 0,17 Гц знак преимущественно был положительный как при включении установки (пламя в течение каждого периода гаснет), а при частотах модуляции 0,42 – 0,91 Гц знак преимущественно становится отрицательным (пламя не гаснет, а лишь периодически пригасает). Именно поэтому удобно ввести понятие модуляции объема пламени: в первом случае глубина модуляции 100 %, а во втором – около 70% (по визуальным наблюдениям). Тогда при некоторой частоте модуляции в интервале $\Delta f_m = 0,15 \div 0,2$ Гц заряд источника будет скомпенсирован и его действие на антенне нивелируется, т.е. величина E_z -составляющей на ленте записи регистрации будет проходить через физический ноль как при отсутствии влияния факела на локальное электрическое поле. На такой частоте модуляции будет записываться только местная электрическая помеха и фактор струи при акустических колебаниях от монополя. Значит, следует ожидать минимальной корреляции между акустическим и электрическим сигналами около этой частоты. Здесь коэффициент корреляции акустического и электрического сигнала будет

менять знак [110]. Слева и справа от указанного выше интервала частот эффекты переменной электрической структуры излучателя исчезают, и вектор поляризации в области приема меняет только свою величину с заданной скоростью, при постоянном направлении.

Задержки 3,0 с и 0,3 с на режимах работы ТУМВ в режимах модуляции с частотой $f_m = 0,08$ Гц и $f_m = 0,17$ Гц, соответственно, обусловлены, вероятно, задержкой начала формирования E -поля от излучателя с избыточным положительным зарядом (топливное облако), так как с ростом p_ϕ диспергирование топлива встречным потоком, а следовательно, разделение зарядов, как необходимое условие создания излучателя, начинается не синхронно с $\Delta p_\phi(t)$, а лишь при наборе потоком топлива определенной (критической) скорости ($v_{кр}$). Далее поток теряет изотропность, превращаясь в совокупность турбулентных молей, терпящих последовательное дробление при продолжающемся росте скорости.

Для того чтобы оценить величины этих критических скоростей, необходимо учесть, что вариации электрического поля помехи имеют вариативность «плюс – минус» показывая текущую стохастическую результирующий исход «поляризация – деполяризация» около физического нуля. Но вариации давления подачи топлива не имеют такой динамики. Если перевести динамику давления подачи топлива к динамике вариаций E_z -поля приходится вводить понятие уменьшенной в 2 раза частоты и отрицательного давления типа вакуумного эффекта (см. рис. 1). Так или иначе при сопоставлении и поиске сопряжения этих сигналов указанный эффект необходимо учитывать. Например, для частот $f_I = 0,08$ Гц и $f_{II} = 0,17$ Гц, характеризующихся наличием перехода от паро-топливной структуры к пламенной через задержку воспламенения Δt и принимая закон изменения $\Delta p(t) = p_0 \cos^2 \frac{\omega}{2} t$ можно оценить предельной скоростью $v_{кр}$ истечения потока топлива, ниже которой формируется крупнодисперсная избыточно положительно заряженная топливная фракция, а

топливное облако обретаёт положительный электрический заряд. Итак, обратимся снова к объяснению графиков рис. 59:

$$1. \Delta p_I(t) = p_0 \cos^2 \frac{\omega_I}{2} \Delta t_I \approx 0,53 p_0 \text{ и } v_{кр}^I \rightarrow 133 \text{ м/с;}$$

$$2. \Delta p_{II}(t) = p_0 \cos^2 \frac{\omega_{II}}{2} \Delta t_{II} \approx 0,98 p_0 \text{ и } v_{кр}^{II} \rightarrow 156 \text{ м/с,}$$

где: $\omega_I = 2\pi f_I$, $f_I = 0,08$ Гц, $\omega_{II} = 2\pi f_{II}$, $f_{II} = 0,17$ Гц, $\Delta t_I = 3$ с, $\Delta t_{II} = 0,3$ с по данным ККФ R_{Epm} (см. табл. 4 на с. 91)

Для сопоставления сигналов функции мощности тепловыделения $\frac{\partial N(t)}{\partial t}$ и тока смещения на приемной антенне $\frac{\partial E(t)}{\partial t}$ продифференцируем $N(t)$:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{A}{2} p_{\tau_0}^{\frac{1}{2}} \omega \sin \frac{\omega}{2} t; \quad \text{или} \quad \frac{\partial N}{\partial t} = -B \frac{\omega}{2} \sin \frac{\omega}{2} t,$$

где $B = A p_{\tau_0}^{\frac{1}{2}}$ - максимальная мощность тепловыделения.

Скорость изменения нормированной функции мощности тепловыделения

$$\frac{\partial(N/B)}{\partial t} = -\frac{\omega}{2} \sin \frac{\omega}{2} t.$$

Скорость изменения давления и нормированного давления в плети:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -2 p_{\tau_0} \frac{\omega}{2} \cos \frac{\omega}{2} t \cdot \sin \frac{\omega}{2} t = -p_{\tau_0} \frac{\omega}{2} \sin \omega t \text{ и } \frac{\partial \left(\frac{p}{p_{\tau_0}} \right)}{\partial t} = -\frac{\omega}{2} \sin \omega t.$$

Скорость изменения нормированной скорости истечения топ-

лива из форсунки:
$$\frac{\partial \left(\frac{v}{v_{max}} \right)}{\partial t} = -\frac{\omega}{2} \sin \frac{\omega}{2} t.$$

Функция $\frac{\partial E(t)}{\partial t}$, формирующая структуру сигнала на приемной антенне, не зависит от расхода массы топлива, но зависит от скорости истечения топлива, обеспечивающего знак электрического заряда и качество сгорания в факеле. Фазовая скорость изменения давления в два раза больше, чем у скорости и мощности тепловыделения. Это объясняется фактором «отрицательного давления» (см. выше). При малых частотах модуляции, когда факел пламени гаснет, следует «дорисовывать» на графике давления провал в отрицательные значения. Этакая математическая проказ!

Электрическое поле пламени на переменном режиме работы ТУМ. Оказалось, что закон изменения радиуса заряженного шара при работе установки метеотрон на переменном режиме давления подачи топлива на форсунки не тождественен закону изменения давления подачи топлива. Перечисленные ниже процессы включаются последовательно и не могут ни опережать друг друга, ни менять порядок очередности включений: увеличение давления подачи топлива на форсунки, увеличение скорости истечения топлива из форсунок, повышение качества диспергирования топлива, через задержку воспламенения горючей смеси, собственно зажигание, формирование струйного факела, взаимодействие струйных факелов. При уменьшении давления подачи топлива на форсунки алгоритм следования процессов незначительно меняется. Появляется параллельность (квазисинхронность) уменьшения скорости истечения и уменьшения длин струйных факелов. Однако и в этом случае уменьшение качества диспергирования топлива приводит практически к «скачкообразному» исчезновению струйных факелов с задержкой на догорание.

Исходя из вышеприведенных соображений вклад данной модели в суммарный сигнал с датчика антенны:

$$\frac{dE}{dt} = AR_m \omega \left(\cos \frac{\omega}{2} t \right)^4 \cdot \sin \omega t, \quad \text{где } A = -\frac{\rho_{er}}{2\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{R_m}{r} \right)^2, \quad R_m -$$

максимальный радиус очага, или длина струйного факела.

Кроме индукционного механизма воздействия очага пламени на область приемной антенны, необходимо рассмотреть порядок величины воздействия локального изменения диэлектрической проницаемости среды вблизи приемной антенны.

Для нестационарного случая:
$$E_z(t) = 0,1 \frac{\rho(t)}{\varepsilon r^2} R^3(t).$$

Давление подачи топлива на форсунки на переменном режиме работы: $p(t) = \frac{1}{2} p_m (\cos \omega t + 1)$ или $p = p_m \cos^2 \frac{\omega}{2} t.$, где p_m – среднее амплитудное значение давления топлива на форсунках на заданном режиме работы.

Принимая за основу качественное подобие функций $R(t)$, $p(t)$ имеем: $R(t) = R_m \cos^2 \frac{\omega}{2} t.$ и $E_z(t) = 0,1 \frac{\rho(t)}{\varepsilon_0 r^2} R_m^3 \cos^6 \frac{\omega}{2} t.$, где R_m – максимальный эквивалентный радиус шара.

Продифференцируем полученное равенство по времени при $\rho = \text{const}$, получая
$$\frac{dE}{dt} = - \frac{0,15 \rho R_m^3 \omega}{\varepsilon_0 r^2} (\cos^4 \frac{\omega}{2} t) \cdot \sin \omega t.$$

Для наших исследований характерными величинами являются: $R_m = 6$ м, $\rho = 1,5 \cdot 10^{-5}$ Кл/м³ при $n_e \approx 10^{14}$, м⁻³ (по результатам зондирования [1]); $\omega = \pi, c^{-1}$: $\frac{dE}{dt} = A \cos^4 \frac{\omega}{2} t \sin \omega t$, где $A \approx - 10^6$ В/м·с.

Ожидаемый качественный вид реализации функции dE/dt показан на рис. 61. Для нестационарного случая:
$$E(t) = \frac{\rho_{eR}}{3\varepsilon\varepsilon_0} \frac{R^3(t)}{r^2}.$$

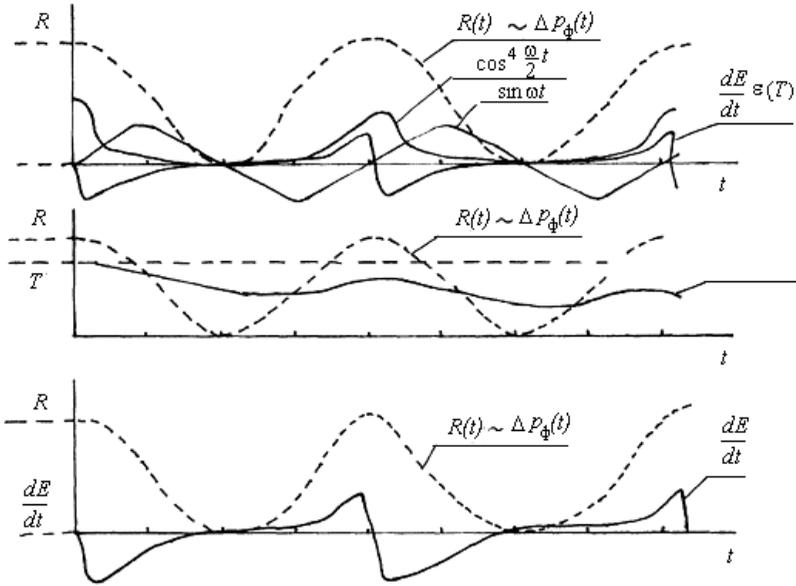


Рис. 61. Ожидаемое качество вида функции $\varepsilon(E)^{-1}$; $\frac{dE}{dt}$ при $R(t) \sim \Delta P_\phi(t)$

На переменном режиме работы метеотрона этот механизм, по мнению авторов, определяющий в формировании E_z - составляющей электростатического поля в точке приема. Поэтому проведем более подробный анализ, задавая функцию радиуса очага по времени. Принимая подобие функций $R(t)$ и $\Delta p_\phi(t)$ имеем:

$R(t) = R_m \cos^2 \frac{\omega}{2} t$, где R_m - максимальный радиус шара.

$$\text{Тогда: } E(t) = \frac{\rho_e}{\varepsilon \varepsilon_0} \frac{R_m^3 \cos^6 \frac{\omega}{2} t}{r^2}$$

Продифференцируем это равенство по времени t :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\rho_{eR}}{3\varepsilon\varepsilon_0} \frac{R_m^3 \cos^6 \frac{\omega}{2} t}{r^2} \right)$$

При постоянных значениях (ρ_{eR}, ε) , имеем:

$$\frac{dE}{dt} = - \frac{\rho_{eR}}{3\varepsilon\varepsilon_0} \left(\frac{R_m}{r} \right)^2 R_m \omega \cos^5 \frac{\omega}{2} t \sin \frac{\omega}{2} t$$

Для наших исследований: $R_{ш} = 6$ м, $r = 30$ м, $\rho_{eR} = 6,5 \cdot 10^{-5}$ Кл·м³. При $n_i = 10^{14}$ м⁻³, $\varepsilon\varepsilon_0 = \varepsilon(T)$; $\omega \cong 0,35$ Гц

$$\text{Тогда: } \frac{dE}{dt} = - \frac{1}{10^5 \varepsilon(T)^{-1}} \cos^4 \frac{\omega}{2} t \sin \omega t,$$

$$\text{или: } \frac{dE}{dt} = A \varepsilon(t)^{-1} \cos^4 \frac{\omega}{2} t \sin \omega t,$$

где $A < 0$, T – температура среды в малой области приема.

На рис. 61 приведены качественные графические решения функции $\frac{dE(t)}{dt}$ и ее составляющих, при их построении принято

$T \sim \frac{1}{\varepsilon(T)}$. Максимум функции $T(t)$ с течением времени удаляется от

максимума функции $R(t)$, а минимумы с течением времени углуб-

ляются. Это обстоятельство подчеркивает изменение $\frac{dE(t)}{dt}$, пред-

определяя ее несимметричность относительно оси $0t$.

Рассмотренная модель недостаточна для описания реальной работы метеотрона по генерации электрического поля, так как процессы распыления, воспламенения, гашения – более сложные, нежели пульсирующая тепловая сфера.

На рис. 62 обозначены характерные участки и точки на временной оси: $\tau_{\text{воспл}}$ – момент времени воспламенения горючей смеси диспергированное топливо-воздух; τ_{t0} – момент времени начала га-

шения очага, гашение мелкой фракции топливного тумана; τ_r – момент времени окончания гашения очага; $\tau_r - \tau_{r0}$ – время догорания крупной фракции топливного тумана.

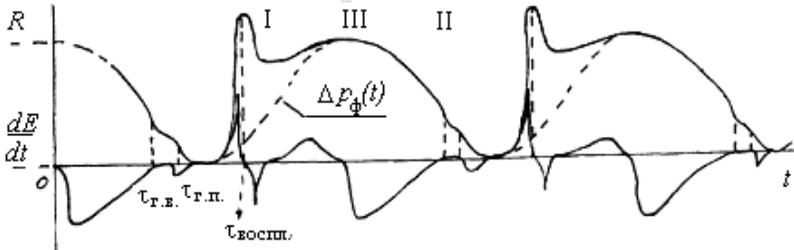


Рис. 62. Ожидаемое качество вида функций $R(t); \frac{dE}{dt}$

Участок I: участок образования топливного тумана. Он тем более явный, чем больше период модуляции, т. е. чем больше $(\tau_r + \tau_{воспл.})$ и тем больше задержка воспламенения (тогда облако тумана успеваеt возрасти до $R_I > R_m$);

Участок II. гашение пламени при падении Δp_{ϕ} происходит не от периферии к центру очага, а сверху вниз, т. е. этот процесс направлен к области крупной фракции в объеме пламени. Основываясь на предыдущем анализе, проведем построение функции $\frac{\partial E}{\partial t}$ рис. 62. И в этом случае рассматриваются изменения произвольного радиуса-вектора сферы, т. е. сфера пульсирует и площадь поверхности сферы меняется по тому же закону, что и ее квадрат радиуса. Однако, в реальном случае пульсирует и объем сферы и радиус-вектор и площадь ее поверхности, причем поверхность сферы негладкая и ее форма меняется во времени.

Это обстоятельство может сказаться ощутимо лишь на участке III, когда фронт пламени сформирован, и более сильно меняются составляющие \vec{E}_i , но не сама величина \vec{E}_z .

Модель вертикального ионно-конвекционного генератора. Расчет массы средней сажевой частицы с использованием результатов зондовых измерений и при характерной величине подвижности $\sim 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, дал оценочный результат $\sim 10^{-20} \text{ кг}$, что при плотности графита $\rho_c = 2,25 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, дает объем частицы $\sim 10^{-23} \text{ м}^3$ для сферы радиуса $3 \cdot 10^2 \text{ \AA}$ [17, 205]. Частицы с радиусом порядка $\sim 10^2 \text{ \AA}$ называются частицами Айткена и для них характерно наличие одного заряда при 20 – 25 процентной заряженности общего количества частиц в поле Земли. Количество частиц с зарядом 2 составляет около 1% от общего числа [17, 47, 119, 205], что, очевидно, меньше погрешности данного оценочного расчета.

Предположим, что в начальном сечении струи каждая такая частица сажи несет элементарный отрицательный заряд, тогда при концентрации заряженных частиц $n_e = 10^{14}, \text{ м}^3$ [172] плотность сажи в тепловой струе составит $2 \cdot 10^5, \text{ кг/м}^3$. Визуальные наблюдения задымленности струи подтверждают реальность этой оценки, тогда плотность тока в начальном сечении тепловой струи при $A_0(z) = 1; n_e \cong 10^{14}, \text{ м}^{-3}; \bar{\omega}_0 \cong 12 \text{ м/с}: j = A_0(z)n_e e \bar{\omega}_0 \cong 5 \cdot 10^{-4}, \text{ А/м}^2$

Плотность тока в конечном сечении струи при $A(z) = 0.2 \div 0.25; n_e \cong 10^{14}, \text{ м}^{-3}; \omega = \frac{45}{H_{max}^{1/3}} \approx 4,5 \text{ м/с}$ [17]:

$$j_k = A_k(z)n_e e \bar{\omega}_{H_{max}} \cong 1,5 \cdot 10^{-5}, \text{ А/м}^2.$$

Полагаем, что объемная плотность отрицательных зарядов по вертикали в струе падает от $A_0 \rho_{естр}$ до $A_k \rho_{естр}$ по экспоненциальному закону: $A(z) = B \exp[-cz]$ при $A_0(z)|_{z_0=10} = 1, z \cong 10 \text{ м}$ (виртуальный источник) $A_k(z)|_{H_{max}} = 0,25, z = H_{max} \sim 10^3 \text{ м}$ [17].

При $\omega(z; B/2) = 45/Z^{1/3}$ получаем $A(z) \cong \exp[-1,5 \cdot 10^{-3} Z]$, где $\omega(z; B/2)$ – средняя по радиусу скорость по сечению струи, $B/2$ – половина радиуса струи

Тогда:
$$j(z) = \frac{45\rho_{e \text{ стр}} \cdot \exp[-1,5 \cdot 10^{-3} Z]}{Z^{1/3}} \quad \text{и}$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{45\rho_{e \text{ стр}} \cdot \exp[-1,5 \cdot 10^{-3} Z]}{\varepsilon Z^{1/3}}$$

Так как $\frac{dz}{dt} = \omega(z; B/2)$, то $dz = \frac{45}{Z^{1/3}} dt$ или $Z \cong (60t + c)^{3/4}$

при $t = 0, z \approx 10\text{м}; c \approx 10\text{с}$. Окончательно:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = - \frac{45\rho_{e \text{ стр}}}{\varepsilon (60t + c)^{1/4}} \frac{1}{\exp[-1,5 \cdot 10^{-3} (60t + c)^{3/4}]} \quad (16)$$

Здесь $\Delta t \approx 0,34\text{с}$ является временем подъема тепловой струи от виртуального источника.

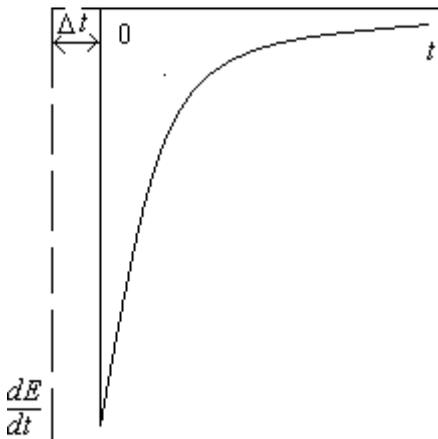


Рис. 63. Качественный ход зависимости (16)

За время $t \sim 160\text{ с}$ ($H_{\text{max}} \cong 10^3$) формирования тепловой струи величина сигнала с приемной антенны монотонно упадет до нуля (рис. 63), что означает установление локального электростатического поля струи. При дальнейшей работе $t > 160\text{ с}$ тепловой установки вклад вертикальной нагретой струи в суммарный сигнал с приемной антенны практически равен нулю. Однако осцилляции образованной конвективной колонки будут

приводить к колебаниям вектора E_z , что безусловно отразится на фазе сигнала приемника. Осцилляции будут иметь случайный характер (скорость изменения ветровой стратификации в приземном слое).

Система уравнений факторов влияния работы метеотрона на локальное электрическое поле в области приема. Запишем все выявленные воздействия работы метеотрона на скорость изменения напряженности электростатического поля:

1 – 2. Уравнения ЗЛ (рис. 64):

$$\frac{dE_{Z1}}{dt} = -\frac{4\rho_e}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{dh_{3Л}}{dt}$$

$$\frac{dE_{Z2}}{dt} = -\frac{4\rho_e}{\varepsilon} \upsilon_r \frac{dh_{3Л}}{dr}$$

3. Уравнение перемещающегося приземного аэрозоля:

$$\frac{dE_{Z3}}{dt} = E_Z \left[A + \frac{d \ln \upsilon_r}{dt} \right]$$

4. Уравнение пульсирующей неоднородно заряженной сферы:

$$\frac{dE_{Z4}}{dt} = \frac{\rho_{eR}}{3\varepsilon\varepsilon_0 r^2} \frac{d[R^3(t)]}{dt}$$

5. Уравнение струи как ионно-конвективного генератора:

$$\frac{dE_{Z5}}{dt} = -\frac{45\rho_e \text{ смр}}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{1}{(60t + 20)^{1/4} \exp[-1,5 \cdot 10^{-3} (60 + 20t)^{3/4}]}$$

6 – 7. Уравнение заряженного сажевого облака аэрозоля:

$$\frac{dE_{Z6}}{dt} = -\frac{4\rho_e}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{dh_{\text{COA}}}{dt}$$

$$\frac{dE_{Z7}}{dt} = -\frac{4\rho_e}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{dh_{\text{COA}}}{dr} \upsilon_r$$

Создание заряженного сажевого облака аэрозоля (COA) – слоя заряженных частиц сажи на высоте отрицательной плавучести струи (слое изотермии) или «вверное перемещение» пассивного участка приводят к экранировке и шунтированию точки приема. На стационарном режиме работы ТУМV эффекты сажевого облака, вероятно, можно оценить зависимостями, аналогичными 1 – 2.

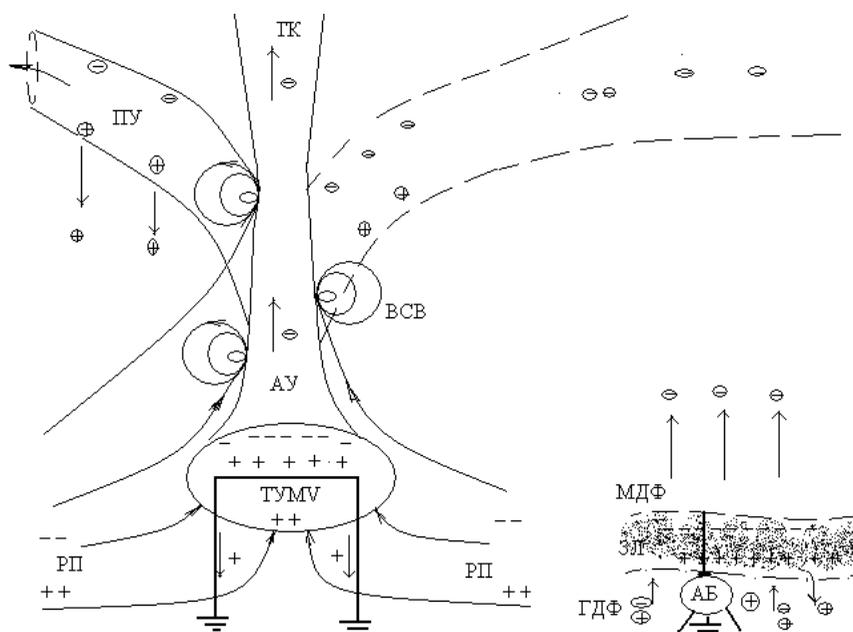


Рис. 64. Схематическое представление потоков воздуха и нагретых продуктов сгорания с пространственным перераспределением электрических зарядов. Обозначения: АБ – антенный блок № 13 [1], АУ – активный участок, ПУ – пассивный участок (показано два крайних положения при «верном перемещении»), ГДФ – грубодисперсная фракция, МДФ – мелкодисперсная фракция, РП – радиальный приток воздуха, ВСВ – вихревые структуры вовлечения, ТК – тепловая (радиационная) колонка

Цель исследований в указанном стиле и алгоритме – сопоставление представлений авторов об источниках формирования сигналов с реальной записью суммарного сигнала в графической форме реализации. Но принятие даже аддитивного характера формирования суммарного сигнала многочисленных факторов влияния, не обнаруживает упрощения подхода, так как интервалы времен задержек «элементарных» слагаемых «размывают» их сопряжение на временной оси. Путь исследования, принятый авторами, поиск системного сопряжения сигналов разной природы.

IV.3. Метеотрон – источник акустических колебаний

Общая характеристика и тип источника. Рассмотрим источник акустической мощности, образующийся при свободном сгорании в воздухе жидкого топлива ТС-1 подаваемого под давлением в 10 МПа и расходом $G = 9,5$ л/с системой струйных форсунок ТУМ V. Принимая процесс горения стационарным по признаку сформированного сплошного пламени объемного горения, определяем источником нагретой струи факел пламени объемного горения с ярко выраженным разномасштабным турбулентным характером горения гетерогенной смеси. Крупномасштабная турбулентность образована форсуночными факелами, образующими пересечением головок фронт турбулентного пламени, который, в свою очередь, обладает способностью генерировать дополнительную турбулентность [81, 200, 208, 209]. Деформация пламени указывает на преобладающий масштаб пульсаций скоростей над толщиной фронта, что и определяет быстрое горение по фронту, так как скорость горения пропорциональна пульсационной составляющей скорости и масштабу пульсации (длине пути вихревого смещения). Длина форсуночных факелов, а, следовательно, объем и площадь поверхности фронта пламени, зависят от скорости истечения. Локальные скорости фронта пламени при крупномасштабном турбулентном диффузионном горении могут значительно отличаться от нулевых или колебаться около нуля с периодом автоколебаний в проточной части тепловой установки. Величины пульсационных составляющих скорости u' могут быть определены в максимальных пределах до 20 – 30 м/с по результатам визуальных наблюдений и кинографирования вихревых смещений.

Термическая конвекция и динамические факторы (разнородные поля скоростей и температуры) позволяют сделать вывод о наличии газодинамических пульсации в вертикальной нагретой струе, которые исходя из неразрывности среды, приводят к колебаниям ее плотности (давления) вне струи, т.е. к акустическим колебаниям [102, 103, 106]. Основное внимание в данной работе уделено регистрации звукового давления в интервале частот 0,1 – 20 Гц, т.е. в пространстве ближней акустической зоны, в которой акусти-

ческие волны не сформировались. Очевидно, что по мере увеличения расстояния изменится и спектр акустического поля. Для практических целей достаточно выполнение неравенства $2R/\lambda = 1/3$, где R – радиус источника, λ – длина излучаемой волны, поскольку в нашем случае источник можно аппроксимировать малой сферой радиусом R [94]. Скорость частиц в ближнем поле следует за звуковым давлением, отставая на $\pi/2$, поэтому ближнее поле не дает вклада в энергию, передаваемую среде источником, и эту часть звукового поля, называют реактивной компонентой, характеризующей смещения среды вблизи источника звука.

Тип источника акустических колебаний – монополь, или излучатель нулевого порядка является характерным для акустических колебаний низких частот и задается симметрией конструкции тепловой установки [1]. Звуковое давление, создаваемое пульсирующей сферой, определяется только ее объемной скоростью и больше ничем [94]. Расчет основных характеристик монополя, пульсирующего с частотой 0,5 Гц, приводится далее.

Участие акустических излучателей высших порядков (диполь, квадруполь и т.д.) в формировании спектра излучения в рассматриваемом диапазоне частот очень мало. Так осцилляция тепловой струи (диполь) на частоте 0,5 Гц приводит к излучению акустической мощности порядка 1 Вт и чем выше порядок акустического излучателя, тем меньше величина излучаемой им звуковой мощности в диапазоне низких частот. Суммарный их вклад в величину акустической мощности не превышает погрешности расчета акустической мощности монополя (~8 %), поэтому их акустическим действием пренебрегаем.

Оценки акустической мощности и давления теплового источника. Проведенные несколькими однотипными сегментарно-разнесенными приемниками (фирмы «Брюль и Кьер») регистрации и последующий пространственно-спектральный анализ выделили слабый «лепесток» из зазора между приподнятыми плетями, названный авторами «фокусом» ТУМV (см. рис. 3). По другим направлениям акустическое излучение в диапазоне инфразвука изотропно, что позволяет принять в качестве модели образующегося

при сгорании топлива факела пламени пульсирующую сферу с оценкой расчетной мощности [210, 211]: $P = \frac{\rho c Q_m^2 k^2}{8\pi(1 - k^2 a^2)}$, где: ρ – плотность вещества в объеме сферы; $c = 20,05 \sqrt{T_0}$ – скорость звука в воздухе; $Q_m = dV/dt$ – объемная производительность источника; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; a – радиус сферы; T_0 – температура окружающей среды; λ – длина волны основного тона излучения.

Для ограниченного пространства измерений $a < 100$ м (по визуальному наблюдению) и генерации излучения частотой 0,5 Гц с соответствующей длиной волны $\lambda = 680$ м, имеем $k^2 a^2 \ll 1$. Следовательно, выражение для акустической мощности источника можно привести к виду: $P = \frac{\rho c Q_m^2 k^2}{8\pi}$.

Для оценки параметров ρ и Q_m , необходимо определить стехиометрическое соотношение компонентов топлива (ТС1 – воздух) и молекулярные веса $\mu_{см1}$ при T_0 и $\mu_{см2}$ при $T_{стех} = 2300$ К [1, 17].

Параметры акустического источника [210]. Объем сферы после сгорания топлива $\dot{V}_2 = \dot{V}_0 \cdot \frac{T_{смex}}{T_0} \cdot \frac{\mu_{см1}}{\mu_{см2}}$, $\dot{V}_0 = \dot{m}_T \rho_T + \dot{m}_B \rho_B = 113$ м³/с.

Подставляя данные, получаем $\dot{V}_2 = 917,1$ м³/с. Тогда, объемная производительность источника $Q_m = dV/dt \cong (\Delta \dot{V}) = 804$ м³/с. Плотности компонентов смеси до и после сгорания (ρ_0 , $\rho_{смex}$):

$$\rho_0 = \frac{P \mu_{см1}}{RT_0} = 1,27 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_{стех} = \frac{P \mu_{см2}}{RT_{стех}} = 0,15 \text{ кг/м}^3$$

Акустическая мощность излучения источника по принятой модели пульсирующей сферы:

$$P = \frac{\rho c Q_m^2 k^2}{8\pi} \cong 113 \text{ Вт.} \quad (17)$$

При объемном расходе $\dot{V}_2 = 917,1 \text{ м}^3/\text{с}$ и объеме сферы $\frac{4}{3}\pi a^3$ радиус пульсирующей сферы: $a = \sqrt[3]{\frac{3V_2}{4\pi}} = 6,03 \text{ м}$, поэтому необходимое допущение $k^2 a^2 \ll 1$ оказалось верным (см. выше).

Средняя скорость частиц вещества пламени $v_0 = \frac{Q_m}{4\pi a^2} = 1,78 \text{ м/с}$ при $Q_m = 804 \text{ м}^3/\text{с}$, что согласуется с обычными скоростями пламени [79, 208, 212]. Механический импеданс пульсирующей сферы:

$$Z = \frac{jka}{1 + jka} \cdot \rho c S = X + jY, \quad \text{где} \quad \text{активное} \quad \text{сопротивление:}$$

$$X = \rho c 4\pi a^2 \cdot \frac{k^2 a^2}{1 + k^2 a^2} = 72,7 \text{ кг/с}, \quad \text{реактивное} \quad \text{сопротивление:}$$

$$Y = \rho c 4\pi a^2 \cdot \frac{ka}{1 + k^2 a^2} = 1305,6 \text{ кг/с}, \quad \text{при} \quad k^2 a^2 = 0,003 \text{ для } f = 0,5 \text{ Гц}$$

и $a = 6,03 \text{ м}$.

Присоединенная масса пульсирующей сферы:

$$M = Y \cdot \frac{1}{2\pi f} = 415,8 \text{ кг}$$

$$\text{Предельный коэффициент излучения } \eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{Y}{X}} \cong 0,15. .$$

Звуковое давление на расстоянии r от излучателя нулевого порядка: $p = \frac{Q_m}{4\pi r^2} \cdot \frac{\rho c k r}{\sqrt{1 + k^2 a^2}} \cdot \cos(\omega t - k\eta + \varphi)$

Максимальные значения звукового давления:

$$p = \frac{Q_m}{4\pi r} \cdot \frac{\rho c k}{\sqrt{1 + k^2 a^2}} \quad \text{или} \quad p = \frac{Q_m}{4\pi r} \cdot \frac{\rho c}{\sqrt{\frac{1 + k^2 a^2}{k^2}}}$$

В подкоренном выражении: $\sqrt{\frac{1+k^2a^2}{k^2}} = \frac{\sqrt{\lambda^2 + 4\pi^2a^2}}{2\pi}$, где

$S = 4\pi a^2$ площадь поверхности монополя. Для частот ниже 1 Гц: $\pi S \ll \lambda^2$, поэтому $p = \frac{Q_m}{2r} \cdot \frac{\rho c}{\lambda}$. Подставляя данные предыдущего расчета: $\rho = 0,15 \text{ кг/м}^3$, $Q_m = 804 \text{ м}^3/\text{с}$, $c = 340 \text{ м/с}$, и принимая $f_m = 0,5$ Гц ($\lambda = 680 \text{ м}$), получаем зависимость: $p = 30/r$, Н/м².

Форма зависимости подтверждается известными опытными результатами иных авторов на промеренных расстояниях [107].

Исследуемый монополюль имеет своеобразие – меняется не давление в локальной области (как в надувном шарике), а плотность, причем плотность меняется уменьшением от уровня внешней среды. Давление в очаге пламени остается лишь немногим меньше окружающего. Имеем своеобразный «вакуумный» монополюль, работающий аналогично вакуумной бомбе, т.е. с N -волной наоборот!

Уровень давления звука монополя L_{pP} :

$$L_{pP} = 10 \cdot \lg \frac{P_{\text{расч}}}{P_{\text{порог}}}, \quad (18)$$

где согласно решению уравнения (17) $P_{\text{расч}} = 113 \text{ Вт}$; $P_{\text{порог}} = I_{\text{порог}} \cdot S$, где $I_{\text{порог}}$ – интенсивность звука порога слышимости и тогда $P_{\text{порог}} = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$ (прил. 6).

Подставляя данные, получаем: $L_{pP} = 110 \text{ дБ}$, чему соответствует $r = 11,5 \text{ м}$ в пересчете на формулу (18), что хорошо совпадает с эквивалентным радиусом r_0 монополя.

Коэффициент преобразования $\eta = \frac{P_a}{P_T} = 3 \cdot 10^{-6}$ значительно

выше верхнего предела $\eta = 10^{-7}$, приводимого авторами [91, 92] для диапазона частот низкого звука (до 1 Гц) излучаемого турбулентным пламенем открытой горелки.

Итак, составной факел пламени и нагретая струя ТУМВ – источники акустических колебаний в диапазоне инфразвуковых ча-

стот и в меньшей степени звуковых. Характер излучения монопольный и в значительно меньшей степени – дипольный.

Распределение уровней давления звука на расстоянии r от излучателя часто определяется зависимостью [213]

$$L_Z = L_p + 10 \cdot \lg \left\{ \left[\frac{\Phi_1}{r_1^2} + (1 - \alpha) \cdot \frac{\Phi_2}{r_2^2} \right] \cdot \frac{1}{\Omega} \right\},$$

где Φ_1 и Φ_2 – коэффициенты направленности прямого и отраженного излучения; r_1 и r_2 – расстояния до приемника от излучателя и от точки отражения, соответственно; Ω – телесный угол.

Для расстояний, сравнимых с полудлиной волны (ближняя зона), принимаем: $\alpha = 1$ при $\Omega = 2\pi$ и коэффициенте направленности монополя $\Phi_1 = 1$. Тогда:

$$L_Z = L_p + 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{r_1^2 \Omega} \right]. \quad (19)$$

На рис. 65 приведены графики расчетных зависимостей (18) и (19). Ход кривых одинаковый, а некоторое их несовпадение объясняется различием r_0 в этих уравнениях (10 м и 0,4 м).

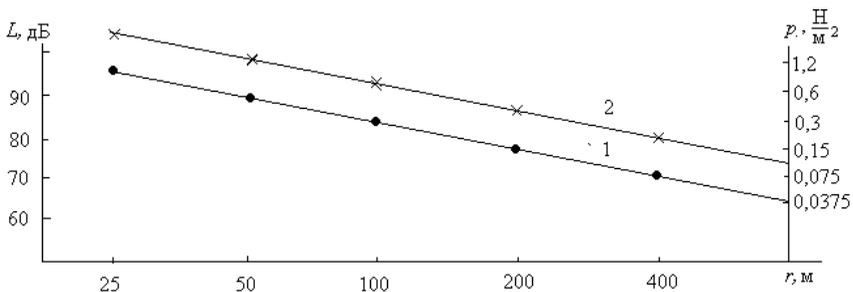


Рис. 65. Расчетная зависимость уровня звукового давления L и звукового давления p акустического монополя от расстояния r до источника: 1 – по формуле 18; 2 – по формуле 19.

Заключение

В третьей книге приведены результаты небольшой части выполненных авторами натурных экспериментальных исследований физических процессов в окружающем пространстве и в диапазоне 0,01 – 100 Гц при работе ТУМВ и метеотронного комплекса «Атмосфера» со вспомогательными функциональными элементами. При воздействии на приземный слой атмосферы источника метеотронного типа с мощностью тепловыделения до 0,4 млн. кВт с площадки $\sim 140 \text{ м}^2$ [1] основная часть энергии, выделяющаяся при свободном сгорании топлива, расходуется на нагрев присоединенной массы воздуха, сообщение ей запаса «плавучести» и турбулизацию потока нагретых продуктов сгорания с образованием вертикальной струи продуктов сгорания. Взаимодействие источника (очага пламени) нагретой струи с окружающей средой формирует системный и характерный структурно-ритмический спектр газодинамической устойчивости системы «пламя – струя – окружающее пространство». О формировании системного динамического процесса можно судить по сопутствующим вариациям естественных помеховых полей и генерацией собственных физических полей в широком диапазоне частот физических параметров: напряженности электрического поля, акустического давления, а также параметров метеоусловий: вектора скорости окружающего воздуха, давления, температуры и влажности [1, 2, 209, 212 – 215].

Необходимость создания, описания и анализа газодинамической модели вертикальной нагретой струи была вызвана фактом, обнаруженным на ранней стадии исследования. Сопутствующие электрические и акустические процессы оказались зависимы статистически, опосредованно через газодинамическую макроструктуру тепловой колонки и нагретой струи [2, 212]. На основе спектрального и корреляционного анализов трех непрерывных процессов: гидродинамического, акустического и электрического, генерируемых при работе метеотрона, выявлен ряд закономерностей поведения крупномасштабного пламени и нагретой струи [1, 17, 63, 135,

188]. Наибольший интерес вызвали следующие газодинамические функции «посредника»: максимальная высота подъема тепловой струи, как функция тепловой мощности; расходная скорость струи, как функция высоты Z ; высота подъема как функция времени.

Авторы взяли на себя смелость провести анализ немногочисленных эффективных и относительно полных по факторам влияния газодинамических моделей подобных нагретых струй. Оценочный расчет в рамках этих моделей [14, 17] позволил не только установить вид искомым функций [17] но и продлить модель до ионно-конвекционного генератора с согласованием расчетных значений функциональных параметров с экспериментальными данными вблизи и вдали от ТУМ. Так эксперименты по регистрации вариаций напряженности электрического поля, проведенные «вдали» от струи, на расстоянии 16 км от метеотрона, показали уменьшение дисперсии напряженности естественного электрического поля, свидетельствуя о работе ионно-конвекционного генератора в режиме протяженного квазиэлектростатического шунтирующего элемента [11, 110] с характерным временем запаздывания «включения» электрического поля тепловой струи [110, 113, 132].

При электризации топлива форсуночные факела обретают небольшие отрицательные электрические заряды [2, 74, 113]. Частотный спектр генерации суммарного заряда, определенный газодинамическими колебаниями и турбулентными пульсациями составного факела пламени, задает вариабельность напряженности электрического поля в окружающем пространстве [2, 17, 110, 113]. Исследуемый КНЧ диапазон предопределяет масштабы выделяемых источников излучения. Возникают локальные области (термики) атмосферы с избыточным электрическим зарядом, генерирующие характерные физические поля, организуемые посредством переходных процессов с сильной вариабельностью основных параметров. Кроме того, нагретая, протяженная по вертикали электрически слабо заряженная отрицательно колонка в естественном электромагнитном поле Земли вызывает динамическую деформацию силовых линий с локальной вариабельностью вектора напряженности электрического

поля на основной частоте собственных газодинамических колебаний нагретой струи [113].

Осциллирующая нагретая струя генерирует электрические и акустические возмущения с основной частотой около 0,08 Гц. Второй общий для обоих процессов источник генерации излучения с частотой 0,2 Гц – периодические срывы периферийных задымленных термиком с очага пламени. Введение пароводяного аэрозоля в тепловую струю существенно усиливает оба эффекта [1, 2, 216]. Корреляционная связь между акустическими и электрическими колебаниями в окружающем пространстве при воздействии на атмосферу мощной тепловой струей, возникающей при работе ТУМ, имеет тенденцию к упрочнению для модулированных внешними факторами газодинамических процессов и на максимальной исследуемой частоте модуляции (0,92 Гц) приближается к функциональной сильно нелинейно – с эффектом смены знака корреляции [110, 132].

Эксперименты по регистрации вариаций уровня звукового давления в точке приема подтвердили известное положение, что мощные открытые пламена являются источниками аэродинамического шума с максимумом энергии на около-нулевых частотах и хочется верить создают «почву для размышлений» читателей и будущих ученых в рамках следующих опытных фактов:

- ТУМ V – мощный акустический излучатель ненаправленного типа с СПМ шумоподобного характера на стационарном режиме работы с абсолютным максимумом плотности мощности (90 ± 1) дБ на частоте не более 0,08 Гц и распределением звукового давления обратно пропорционально расстоянию от источника;

- ТУМ V – мощный акустический монополюсный излучатель с узкополосным СПМ на переменном режиме работы с генерацией мощности до 130 Вт на основной частоте 0,5 Гц модуляции производительности;

- ТУМ V – эффективный преобразователь тепловой мощности в акустическую мощность для диапазона частот ниже 1 Гц, и превосходящий на порядок известные подобные преобразователи.

Обозначения и сокращения авторов

Буквенные и цифровые обозначения и сокращения:

ТС-1 – марка авиационного керосина,

ТУМ – тепловая установка метеотрон,

Метеотрон II, ТУМII, ТУМIII, ТУМV – тепловые установки метеотрон второй, третьей и пятой модификации,

ТРД – турбореактивный двигатель типа ВКIA,

ФС – флуктуационная составляющая,

КНЧ – крайне-низкочастотный диапазон,

СНП – 120 – станция насосная передвижная указанной производительности,

ЭЭГУ16-02 – электроэнцефалограф универсальный 16-канальный,

МТТ (модель МТТ) – газодинамической модели Мортон – Тейлора – Турнера,

ЗЛ – «заряженный лист»,

E -поле – напряженность электрического поля,

E_r и E_z – горизонтальная (по радиус вектору) и вертикальная (вдоль оси OZ) составляющая напряженности электрического поля,

$E_z(t)$, $L(t)$, $p(t)$ – параметры синхронной регистрации вертикальной составляющей напряженности электрического поля, звукового и инфразвукового давления и гидродинамического давления в системе подачи топлива на форсунках установки на стационарном и переменном режимах работы ТУМV,

СЕВ – система единого времени,

СНЧ – сверх низкочастотный,

ЭГД – электрогазодинамический,

ЭДС – электродвижущая сила,

ЮЗ, ЮВ – юго-западное и юго-восточное направление ветра, соответственно,

$\langle Q \rangle$, Q_{\max} – средний и максимальный расход воды, соответственно,

УСЧ8-03 – регистратор электрических сигналов с антенны, восьми-канальный,

СПМ ($G^*(f)$) – спектр плотности мощности,

АКФ – автокорреляционная функция,
 ХА – термopара хромель – алюмель,
 ЭП – электрическое поле,
 ЭМП(З) – электромагнитное поле (Земли),
 ФС – флуктуационная составляющая,
 ИС – импульсная составляющая,
 АЧХ – амплитудно-частотная характеристика,
 $2\Delta f$ – полоса пропускания по частоте,
 атм – внесистемная единица измерения давления,
 Символьные обозначения: v – скорость, T (или t) – температура (или период), i – ток с ионoметра, или сорт частиц, I – ток с двигателя, E – напряженность электрического поля, n – число оборотов компрессора (или концентрация), r (или l) – расстояние, R (или a, r, b) – радиус струи (или пламени), τ (или t) – время, δ – толщина слоя (или стенки), ρ – удельное сопротивление или плотность, Å – ангстрем, m – масса, d – диаметр, D – диаметр (или фрактальная размерность или коэффициент амбиполярной диффузии), N – число всех частиц, Z – число всех заряженных частиц одного знака, σ – стандартное отклонение, p_K – парциальное давление атомов калия, $h_{\text{эфф}}$ – эффективная высота, f – частота, Π – процедура произведения, l_i – обозначения номера приемного канала (или расстояние от пульверизатора), $\langle f_m \rangle$ средняя частота при ручной модуляции давления подачи топлива, $\langle L \rangle, \langle E \rangle$ – средние амплитудные уровни на стационарных участках записи уровней инфразвука и напряженности электрического поля, Sh – число Шервуда, v_r – горизонтальная составляющая скорости, $\nu = 1/T$ – частота срывов вихрей, v_ϕ – средняя скорость истечения паро-топливной фракции из форсунок ТУМ.
 $\Delta\tau_{\text{воспл}} = \Delta\tau_{\text{физ}} + \Delta\tau_{\text{хим}}$ – время задержки воспламенения равно сумме физической и химической составляющих, Re – электрическое число Рейнольдса, b_i – подвижность ионов, $\langle \mu \rangle$ – средняя подвижность капель в электрическом поле, η – коэффициент динамической вязкости (или теплотворная способность топлива, или предельный коэффициент излучения), k – постоянная Больцмана, ϵ – диэлектри-

ческая проницаемость, ϕ – потенциал, ε_0 – диэлектрическая постоянная, $Q(q)$ – объемный (массовый) расход или электрический заряд, $\langle q \rangle$ – средний заряд частиц, k_1 – электрическое отношение, $\langle k_1 \rangle$ – среднее электрическое отношение (для туманов), h – высота, $h_{\text{экв}}$ – эквивалентная высота цилиндрического излучателя, p – давление подачи топлива, атм, $\Delta N/N$ – относительная частота попаданий, средний ($\langle d \rangle$) наиболее вероятный ($d_{\text{нв}}$) и медианный ($d_{\text{МЕ}}$) диаметры капли, $\Sigma \langle S \rangle$ – суммарная средняя площадь капель в проекции на пластину, $\Sigma \langle V \rangle$ – суммарный средний объем, d_g – средний геометрический диаметр, σ_g – стандартное геометрическое отклонение, $f(d)$ – функция плотности вероятности логарифмически-нормального распределения (ЛНР), R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации, $\langle C_k \rangle$ – средняя электроемкость капли, U – потенциал пульверизатора, C – электроемкость капли или концентрация соли в воде, %, $k_{\text{пр}}$ – коэффициент приведения вольт-амперных зависимостей к одному расходу воды, Fr_0 – локальный аналог числа Фруда (Fr), Ro – критерий Россби, v_0 , τ_0 – осевые скорость и перегрев относительно температуры окружающей среды $T_{\infty 0}$ в начальном («0») сечении струи, \bar{v} – вертикальная средняя по расходу скорость струи в заданном сечении, α – константа вовлечения, равная отношению горизонтальной скорости потока на границе струи к вертикальной, ρ_0 , ρ_1 – плотности среды на уровне источника и по струе, соответственно, γ – градиент температуры по вертикали стандартной атмосферы, H_0 – высота начала «разворачивания» струи, P – мощность источника, кВт, или звуковое давление, q – теплосодержание, C_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении, \vec{E}_3 – напряженность электрического поля Земли; \vec{E}_0 – напряженность поля приземного аэрозоля; σ – электропроводность приземного слоя аэрозоля, суммарный вектор скорости $\vec{v}_z(t) =$ естественной ветровой $\vec{v}_{\text{ре}}$ + метеотронной $\vec{v}_{\text{рм}}$, S – внутреннее сечение плети, z – текущая высота вдоль оси OZ , Δz – толщина слоя (воздуха), j – плотность тока, ρ_e – плотность электрических зарядов,

$\vec{U}_{\text{отн}}$ – вектор скорости относительно среды, ρ_T – плотность истекающего топлива, $\tau_{\text{воспл}}$ – момент времени воспламенения горючей смеси диспергированное топливо-воздух; $\tau_{\text{г0}}$ – момент времени начала гашения очага, гашение мелкой фракции топливного тумана; $\tau_{\text{г}}$ – момент времени окончания гашения очага; $\tau_{\text{г}} - \tau_{\text{г0}}$ – время догорания крупной фракции топливного тумана, c – скорость звука в воздухе, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; a – радиус сферы, λ – длина волны основного тона излучения, $T_{\text{стех}}$ – температура горения при стехиометрических условиях, $\mu_{\text{см}}$ – молекулярная масса, Z – механический импеданс пульсирующей сферы, X – активное сопротивление, Y – реактивное сопротивление, L_p – уровень давления звука монополя, дБ, Φ_1 и Φ_2 – коэффициенты направленности прямого и отраженного излучения; Ω – телесный угол

Приложения

Приложение 1

К опыту по определению знака излучателя Е-поля. Полное описание методики эксперимента приведено ранее на страницах 49 – 51. Перед опытом принимается, что Земля отрицательна по отношению к потенциалу «+» элемента 5 (см. рис. 13). На калибровочный шар всегда (во всех опытах) подается «+».

На рис. П1. приведены графические реализации диаграмм опыта по определению направления отклонения пера самописца в зависимости от знака и величины потенциала φ на калибровочном шаре. Амплитуда отклонений пера самописца во всех экспериментах почти одна и та же, что означает эффект постоянной емкости:

1. Отклонение пера вниз – заряд конденсатора – шара: «+» относительно Земли («+» – копится);

2. Отклонение вверх – разрядка конденсатора («+» – расходуется) на большой «+» элемента 5 (рис. П3.П1) [160].

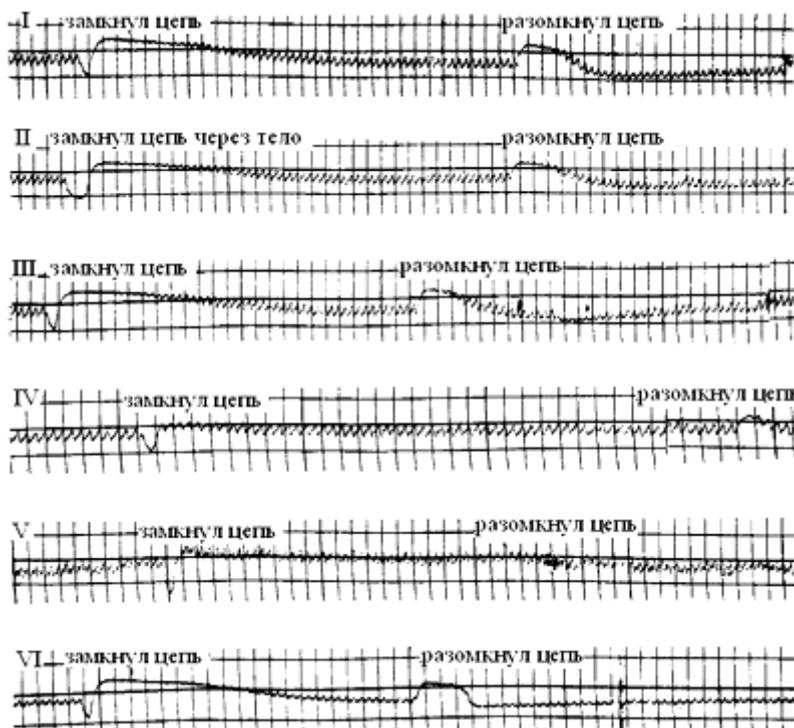


Рис. III. (опыт от 1.12.81). Последовательные во времени участки диаграммы опыта по определению направления отклонения пера самописца в зависимости от знака и величины потенциала ϕ на калибровочном шаре: I, II, III, VI – потенциал ϕ ; IV – потенциал $0,2\phi$; V – потенциал $0,1\phi$.

Приложение 2

Масштабированные копии участков диаграмм записи 31.10.81

На масштабированных по вертикали копиях диаграмм авторы оставили эффекты разбрызгивания чернил, координатную сетку ленты и некоторые пометки, сделанные рукой одного из авторов и эффекты модуляции 50-герцовой помехи, подтверждающих оригинальность представленных масштабированных копий участков диаграмм.

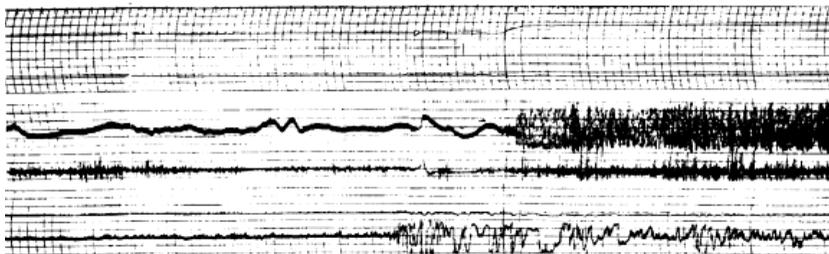


Рис. 1П2. Начальный участок диаграммы (67 с): уровень и характер помехи (38 с); 3 - запуск ТУМ (2 с); ФЗ - факельное зажигание: $t_0 = 0$. Скорость протяжки 7,5 мм/с

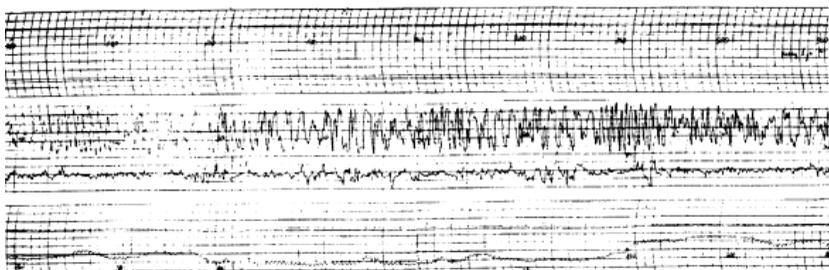


Рис. 2П2. Часть расчетного участка № 1 диаграммы (4 с) с увеличенной скоростью протяжки ленты (120 мм/с)

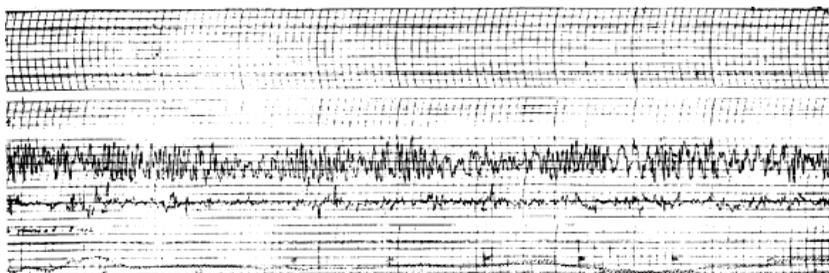


Рис. 3П2. Часть расчетного участка № 2 диаграммы с 69 по 74 с (4,5 с) с увеличенной скоростью протяжки ленты (120 мм/с)

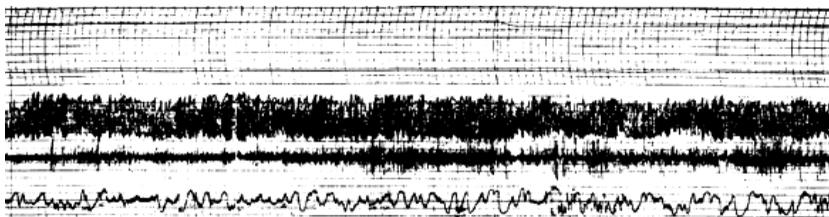


Рис. 4П2. Участок диаграммы с 73 по 146 с (73,5 с) с изменением режима работы ТУМ на 115 с

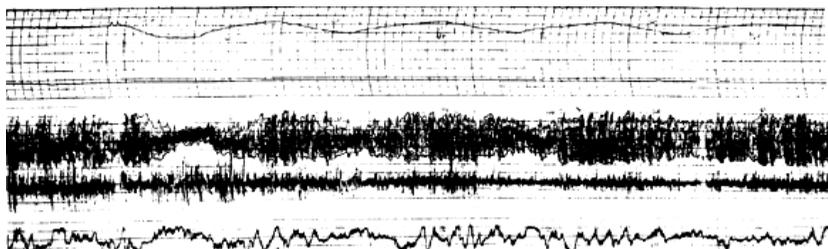


Рис. 5П2. Расчетный участок № 4 диаграммы с 163 по 225 с (62 с работы ТУМ с участком модуляции 49 - 50 с. Переменный режим ($f_m = 0,08$ Гц)

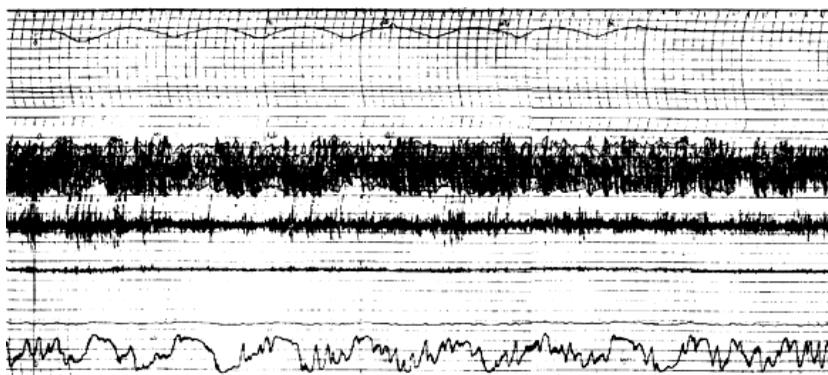


Рис. 6П2. Расчетный участок № 5 диаграммы с 226 по 282 с (66 с работы ТУМ с участком модуляции 41 - 42 с). Переменный режим ($f_m = 0,17$ Гц)

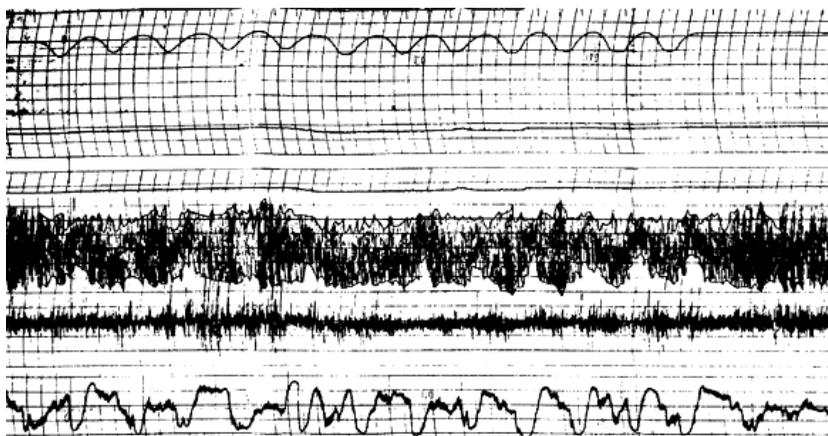


Рис. 7П2. Расчетный участок № 6 диаграммы с289 по 328 с (39 с работы ТУМ с участком модуляции 30 с). Переменный режим ($f_m = 0,40$ Гц)

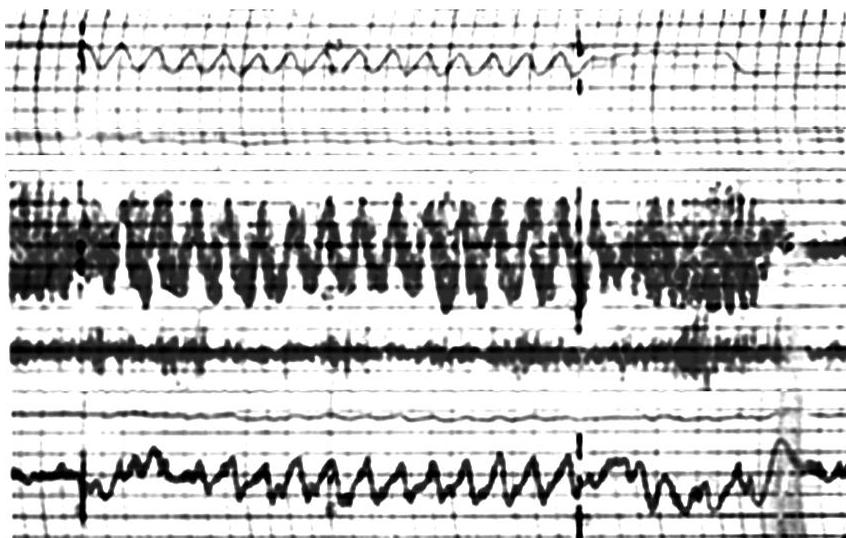
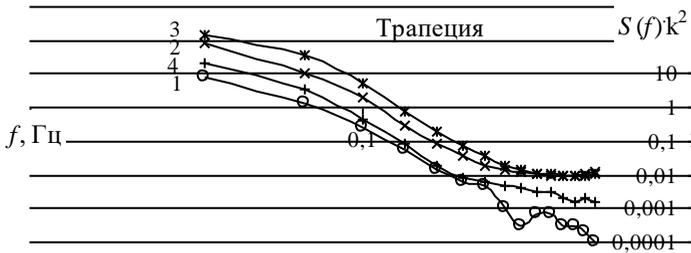
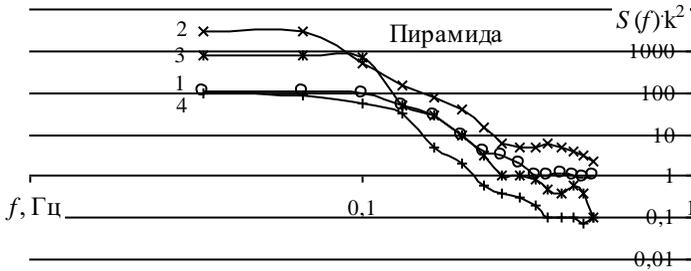


Рис. 8П2. Расчетный участок № 7 диаграммы 324 по 353 с (29 с работы ТУМ с участком модуляции 16 – 17с). Переменный режим ($f_m = 0,92$ Гц). В конце участка - выход на режим ТУМ на 5 с и сброс давления подачи топлива до нуля (окончание работы).

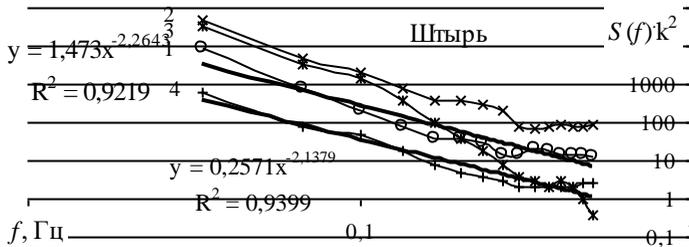
Функция вариативности расхода pulverизатора



а



б



в

Рис. 1ПЗ. СПМ по трем приемным каналам: «трапеция 6-4,5» (а), «пирамида 4-4» (б), «штырь у забора 1-2,4» (в) [1] и четырем участкам записи регистрации: 1 – до включения ТУМ с линией тренда, 2 – работа ТУМV и включение воды (4 –ая минута), 3 – работа комплекса «Атмосфера» (25-я минута), 4 – после выключения ТУМV и комплекса с линией тренда

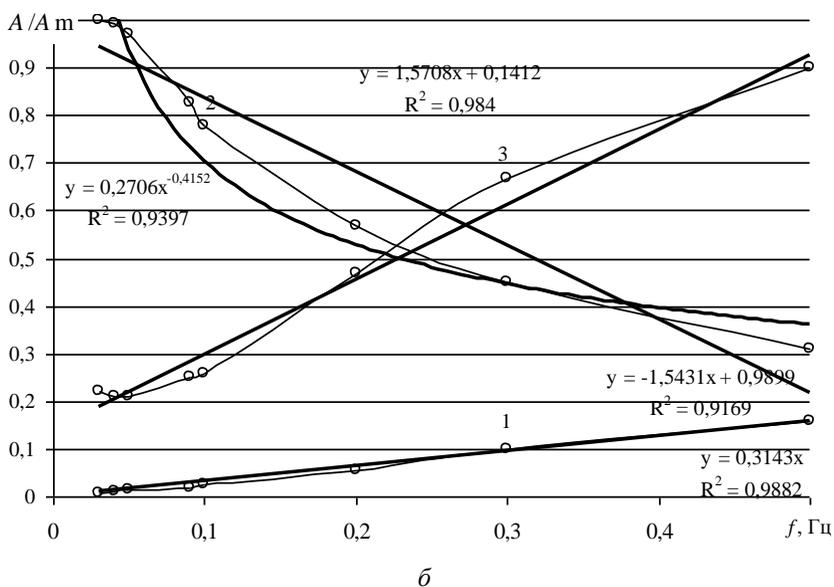
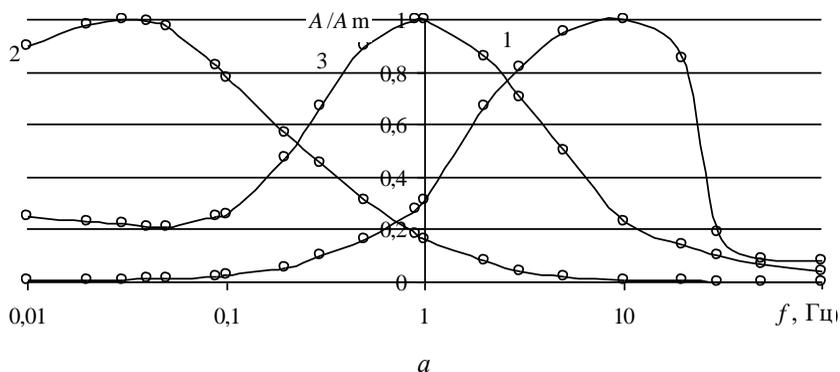


Рис. 2ПЗ. Амплитудно-частотные характеристики приемных каналов: 1 – «штырь у забора 1-2,4», 2 – «трапеция 6-4,5» и 3 – «пирамида 4-4» в диапазоне частот $10^{-2} - 10^2$ Гц (см. рис. 7 и [1]) (*a*) и в исследуемом диапазоне частот 0 – 0,5 Гц с аппроксимацией функциональными линиями тренда с указанной достоверностью (R^2) (*б*)

Функция вариативности расхода воды пульверизатором.

При тестировании режима работы пульверизатора была обнаружена вариативность расхода Q разбрызгиваемой воды. Экспериментальная оценка среднего расхода и характеристик его вариативности проводилась в режиме текущего времени (t) от момента включения установки ($t = 0$) до установленного интервала времени проведения полного измерительного эксперимента (около 5 минут). Фиксированное пошаговое значение (5 мл) убыли воды из емкости 2 (рис. 1ПЗ) сопоставлялось с соответствующим интервалом времени (Δt). Оказалось, что величина Q варьируется около среднего значения $\langle Q \rangle = 0,278$ г/с в пределах $\pm 0,052$ г/с (рис. 4П1) без учета максимального значения $Q_{\max} = 0,385$ г/с в начальный интервал времени 13 с при включении и расходе первых 5 мл воды. Выход установки на устойчивый режим работы оценивался этим интервалом, а величина Q_{\max} была исключена из оценки $\langle Q \rangle$.

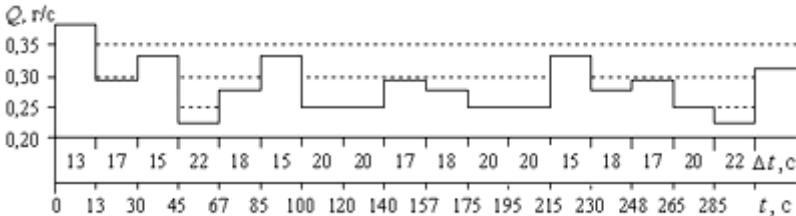


Рис. 4П1. Экспериментальный график вариативности расхода воды

Влияние формы капли на размер при осаждении на парафиновой подложке в гравитационном поле. Для сопоставления измеряемого радиуса капли и радиуса r_c исходной сферы (без контакта с поверхностью пластины) зададим область контакта капли с поверхностью парафина в форме уплощения «вдавливанием» шарового сегмента высотой h и диаметром $2a$. При росте радиуса исходной капли область контакта на поверхности парафина растет, и форма капли приближается к полусферической. При равенстве объ-

емов исходной и измеряемой капли: $r = r_c \sqrt[3]{2} = 1,26r_c$. Далее, при росте капли, контактирующей с поверхностью парафина, радиус кривизны ее наружной поверхности растет, обретая признак уплощения. Капля обретает форму, близкую к эллипсоиду вращения. При равенстве объемов эллипсоида вращения, измеренное значение радиуса r определено большей полуосью эллипсоида $r = r_c \sqrt{r_c / b}$, где b – размер малой полуоси эллипсоида, или полувысота приплюснутой капли. Полагая, что дополнительное давление внутри и снаружи капли не меняется, используем формулу Лапласа в принятых обозначениях: $\frac{2}{r_c} = \frac{1}{r} + \frac{1}{b}$, и подставляя $b = \frac{r^3}{r_c^2}$, получаем: $r_c^3 - 2rr_c^2 + r^3 = 0$ с решением $r = 1,64r_c$. Последующий рост радиуса попавшей на поверхность парафина капли приведет к приближению формы цилиндра малой высоты (диска), что при сохранении симметрии даст предельный результат $r = 1,7r_c$.

Приложение 6

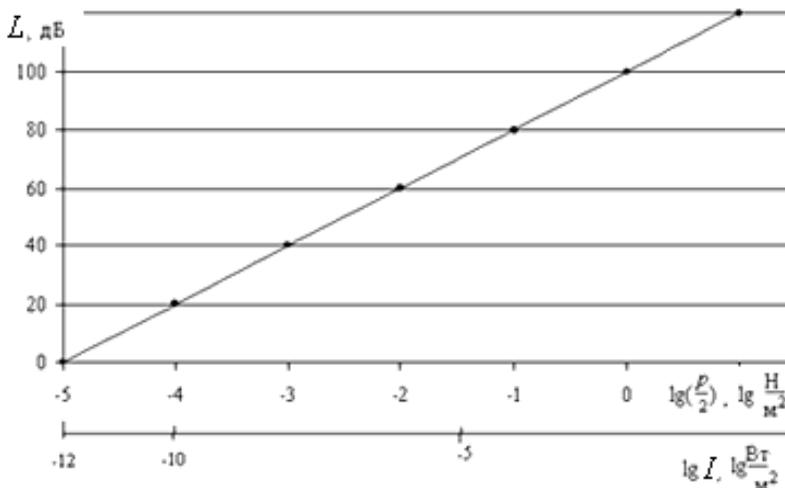


Рис. Пб. График перевода уровней звукового давления L в звуковое давление p и интенсивность звука I

Библиографический список

1. Кузнецов, А.А. Метеотрон: монография. В 2 кн. Кн. 1. Научно-исследовательский комплекс / А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов. – Владимир: Изд-во ВлГУ. 2015. 167 с.
2. Кузнецов, А.А. Метеотрон: монография. В 2 кн. Кн. 2. Эксперименты. Наблюдения. Оценки. Регистрации / А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов. – Владимир: Изд-во ВлГУ. 2015. 232 с.
3. Конопасов, Н.Г. Электромагнитное поле мощной тепловой вертикальной струи / Н.Г. Конопасов, В.Н. Кунин, В.С. Плешивцев // Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 16, № 8. С. 872 – 874.
4. Кремешкова, С.А. О корреляционной связи вариаций электромагнитного поля с метеопараметрами/ С.А. Кремешкова, Ю.М. Ивонин, В.А. Дмитриев [и др.] // Радиопомехи КНЧ диапазона и их природа. – Рязань: РРТИ. 1976. С. 45 – 48.
5. Качурин, Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы/ Л.Г. Качурин. – Л.: Гидрометеиздат. 1973. 365 с.
6. А.С. 938831 (СССР). Метеотрон. Н.Г. Конопасов, В.Н. Кунин.- Заявл. 15.04.80, № 291469/30-15. Оpubл. в Б.И., 1982, № 24, А 01 15/00.
7. Кузнецов, А.А. Динамика внутренних макропроцессов в пламени и тепловой струе/ А.А. Кузнецов, О.Д. Бухарова // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. /Материалы VII международной науч.-техн. конф. – Севастополь: СГТУ. 1998. С. 57.
8. Кузнецов, А.А. Тепловая установка метеотрон/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов, В.В. Дорожков [и др.]// Прикладные проблемы механики жидкости и газа. Материалы VIII международной науч.-техн. конф. – Севастополь: СГТУ.1999. С. 7 – 11.
9. Кузнецов, А.А. Комплекс метеотрон/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Современные проблемы математики и естествознания. Часть 2. Физика. Химия. Экология. Материалы первой Всероссийской научно-технической конференции. – Нижний Новгород: НГТУ. 2002. С.11 – 13.

10. Кузнецов, А.А. Вертикальная свободная струя продуктов сгорания как динамическая структура/ А.А. Кузнецов, О.Д. Бухарова, А.В. Волкова // VIII Столетовские чтения: Тез. докл. – Владимир: ВГПУ 2000. С. 63 – 68.

11. Кузнецов, А.А., Локальное электростатическое поле, возникающее при работе метеотрона/ А.А. Кузнецов, В.Н. Кунин, Н.Г. Конопасов [и др.]// Электрофизика горения. Тез. докл., XIII Всесоюзн. сем., Чебоксары, 1990, с.26.

12. Кузнецов, А.А. Исследование мощной тепловой струи метеотрона/ А.А. Кузнецов // Тез. докл. Всесоюзн. сем. по динамике пространственных и неравновесных течений жидкостей и газов. - Челябинск-Миасс: АН СССР 1991. С. 53 – 55.

13. Конопасов, Н.Г. Электромагнитное поле увлажненной тепловой вертикальной струи метеотрона/ Н.Г. Конопасов, В.Н. Кунин, А.А. Кузнецов [и др.]// Физика атмосферы и океана. 1985, Т. 21, № 6. С. 662 – 666.

14. *Morton, B.R.. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous source/ B.R.. Morton, G.I. Taylor., J.S. Turner //Proc. of the Royal Soc., 1956, v. A234, № 1196. P. 1 – 23.*

15. Галкин, А.Ф. Экспериментальное исследование электрической и газодинамической структуры горизонтальной скоростной тепловой струи/ А.Ф. Галкин, Н.Г. Конопасов, А.А. Кузнецов [и др.] // Электрофизика горения. Тез. докл. XIII Всесоюзн. сем. Чебоксары, 1990. С. 27.

16. Галкин, А.Ф. Экспериментальное исследование электрической и газодинамической структуры горизонтальной скоростной тепловой струи/ А.Ф. Галкин, Н.Г. Конопасов, А.А. Кузнецов// XXV научн. конф. ВПИ, Тез. докл. Владимир. 1990. Т. 2. С. 27.

17. Кузнецов, А.А. Исследование тепло- и электрофизических свойств мощной тепловой струи/ А.А. Кузнецов. Диссертация ... канд. физ.-мат. наук. – Одесса: ОГУ. 1988. 188 с.

18. Леб, Л. Статическая электризация/ Л. Леб. – М.-Л.: Госэнерго. 1962. 405 с.

19. Физические величины: Справочник/А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский [и др.]; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоиздат. 1991.1232 с.

20. Нефтепродукты (*Справочник*). /Под ред. Лосикова Б. В. – М.: Химия. 1966. 776 с.
21. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию/ П. Райст: пер. с англ. под ред. Б.Ф. Садовского. – М.: Мир. 1987. 280 с.
22. Френкель, Я.Л. Механизм электризации твердых и жидких тел при распылении/ Я.Л. Френкель. 1948. ЖЭТФ. 18, № 9. С. 798 – 806.
23. Зандберг, Э.Я. Поверхностная ионизация/ Э.Я. Зандберг, Н.И. Ионов. – М.: Наука, 1969. 432 с
24. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей/ Н.А. Фукс. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. 353 с.
25. Нестеренко, Н.А. Образование сажевых классов в углеводородном пламени в электрическом поле/ Н.А. Нестеренко, Э.Н. Таран // Электрофизика горения. Тез. докл., XIII Всесоюзн. сем., Чебоксары, 1990. С. 31 – 32.
26. Теснер, П.А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы/ П.А. Теснер. – М.: Химия, 1972. 136 с.
27. Кузнецов, А.А. О сажеобразовании в пламени метеотрона/ А.А. Кузнецов / Столетовские чтения, IX Всероссийская научно-методическая конференция по физике. – Владимир: ВлГПУ, 2005. С. 80 – 82.
28. Цеханович, М.С. Исследование влияния технологических параметров процесса на интенсивность коксообразования в реакторах производства сажи/ М.С. Цеханович, Г.И. Орехова, В.Ф. Суrowsикин / Производство и свойства углеродных саж/ Под ред. к.т.н. Суrowsикина В.Ф. Научные труды, вып. 1. ВНИИСП, Омск, Зап. Сиб. кн. изд во. 1972. С. 202 – 209.
29. Ватажин, А.Б. Электрическая зарядка частиц сажи в выхлопных струях авиационных двигателей/ А.Б. Ватажин, А.М. Старик, Е.К. Холщевникова // Изв. АН, МЖК, № 3. 2004. С. 34 – 43.
30. Ключко, Б.Н. Определение дисперсности саж оптическим методом/ Б.Н. Ключко, В.И. Рубан, В.Н. Аникеев [и др.]/ Производство и свойства углеродных саж/ Под ред. к.т.н. Суrowsикина В.Ф. Научные труды, вып. 1. ВНИИСП, Омск, Зап. Сиб. кн. изд во. 1972. С. 138 – 144.

31. *Magnussen, B.F.. An investigation into the behavior of soot in a turbulent free jet C₂H₂-flame/ B.F. Magnussen/ 15-th Symposium (Int) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1975. P. 1415 – 1425.*

32. Теснер, П.А. Образование сажи при горении/ П.А. Теснер// ФГВ, Т.15, № 2, 1979. С. 3 – 14.

33. Самойлов, В.С. Дополнительные данные о структурности саж и внутренней структуре их частиц/ В.С. Самойлов, Н.Д. Сенин, Б.Н. Смирнов [и др.]/ Производство и свойства углеродных саж/ Под ред. к.т.н. Суровикина В.Ф. Научные труды, вып. 1. ВНИИСП, Омск, Зап. Сиб. кн. изд во. 1972. С. 96 – 112.

34. Суровикин, В.Ф. Исследование кинетики и механизма образования дисперсного углерода при разложении жидких углеводородов/ В.Ф. Суровикин / Производство и свойства углеродных саж/ Под ред. к.т.н. Суровикина В.Ф. Научные труды, вып. 1. ВНИИСП, Омск, Зап. Сиб. кн. изд во. 1972. С. 9 – 30.

35. Рогов, А.В. Исследование получения печной окисленной сажи для печатных красок/ А.В. Рогов, В.Ф. Суровикин, Н.Н. Немеровец [и др.]/ Производство и свойства углеродных саж/ Под ред. к.т.н. Суровикина В.Ф. Научные труды, вып. 1. ВНИИСП, Омск, Зап. Сиб. кн. изд во.1972. С. 191 – 201.

36. Лялина, Н.М. О влиянии кристаллографического строения поверхности сажи на структурно-механические характеристики модельных систем, смесей и вулканизатов/ Н.М. Лялина, Н.Н. Лежнев, О.С. Аленинина/ Производство и свойства углеродных саж/ Под ред. к.т.н. Суровикина В.Ф. Научные труды, вып. 1. ВНИИСП, Омск, Зап. Сиб. кн. изд во. 1972. С. 364 – 372.

37. Киселев, Я.С. Критические условия самовозгорания сажи и химическая активность ее поверхности/ Производство и свойства углеродных саж/ Я.С. Киселев, А.С. Абрамов / Под ред. к.т.н. Суровикина В.Ф. Научные труды, вып. 1. ВНИИСП, Омск, Зап. Сиб. кн. изд во.1972. С. 233 – 241.

38. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей/ А. Адамсон: пер. с англ. И.Т. Абидора/ Под ред. З.М. Зорина и В.М. Муллера. – М.: 1979. 550с

39. Бабич, А.И. Предварительная обработка пылеугольного топлива электрическим полем/ А.И. Бабич, В.С. Шкляр // Электрофизика горения. Тез. докл., XIII Всесоюзн. сем. – Чебоксары, 1990. С. 30.

40. Филимонова, Г.Д. Влияние кислорода, связанного поверхностью печных активных саж, на свойства модельных дисперсий и резин/ Г.Д. Филимонова, М.К. Красильникова, Т.С. Бобровская [и др.]/ Производство и свойства углеродных саж/ Под ред. к.т.н. Сурувикина В.Ф. Научные труды, вып. 1. ВНИИСП, Омск, Зап. Сиб. кн. изд во. 1972. С. 354 – 362.

41. Сурувикин, В.Ф. Исследование печного процесса получения высокодисперсных саж/ В.Ф. Сурувикин, Л.С. Казаков, Н.К. Кореньяк / Производство и свойства углеродных саж/ Под ред. к.т.н. Сурувикина В.Ф. Научные труды, вып. 1. ВНИИСП, Омск, Зап. Сиб. кн. изд во. 1972. С. 151 – 178.

42. Киселев, Я.С. Влияние термообработки на технологические и усиливающие свойства саж/ Я.С. Киселев, Е.И. Пашенко, Г.Н. Садовничук [и др.]/ Производство и свойства углеродных саж/ Под ред. к.т.н. Сурувикина В.Ф. Научные труды, вып. 1. ВНИИСП, Омск, Зап. Сиб. кн. изд во. 1972. С. 320 – 330.

43. Красильникова, М.К. Исследование адсорбции пара воды на отечественных сажах/ М.К. Красильникова, Н.Н. Лежнев / Производство и свойства углеродных саж/ Под ред. к.т.н. Сурувикина В.Ф. Научные труды, вып. 1. ВНИИСП, Омск, Зап. Сиб. кн. изд во. 1972. С. 63 – 69.

44. Шопин, В.М. Исследования осаждения сажевых частиц на каплях жидкости в турбулентном газовом потоке/ В.М. Шопин, В.В. Супонев / Производство и свойства углеродных саж. Научные труды. Вып. 1. – Омск: ВНИИСП. 1972. С. 242 – 252.

45. *Starik, A.M. Modeling of sulfur gases and chemiions in aircraft engines/ A.M. Starik, A.V. Savel'ev, N.S. Titova [etc]// Aerospace Science Technology. 2002. V. 6. № 1. P. 63 – 81.*

46. *Arnold, F. Jet engines exhaust chemiion measurements: Implications for gaseous SO₃ and H₂SO₄/ F. Arnold, T. Stilp, R. Busen [etc]// Atmospheric Environment. 1998. V. 32. № 18. P. 3073 – 3077.*

47. Nolan, P.J. *Experiments on condensation nuclei*/ P.J. Nolan. *Proceedings of the Royal Irish Academy, v. XI.VII., Section A, No 2, Dublin, 1941. P. 25 – 38.*

48. Лаутон, Дж. Электрические аспекты горения/ Дж. Лаутон, Ф. Вайнберг / пер. с англ. Под общ. Ред. В.А. Попова. – М.: Энергия. 1976. 296 с.

49. Гуллыев, Ч. Радикал перинафтенил, образующийся в процессе сгорания нефтепродуктов – предшественник сажеобразования/ Ч. Гуллыев, В.Д. Милованов, И.А. Хазен [и др.]// Электрофизика горения. Тез. докл., XIII Всесоюзн. сем. – Чебоксары, 1990. С. 39.

50. Афанасьев, В.В. К вопросу влияния электрических полей на вибрационное распространение пламени/ В.В. Афанасьев, С.В. Ильин // Электрофизика горения. Тез. докл., XII Всесоюзн. сем. – Караганда, 1989. С. 41.

51. Кидин, Н.И. Ламинарное пламя в постоянном электрическом поле / Н.И. Кидин, В.Б. Либрович// Физика горения и методы ее исследования / Под ред. С.А. Аbruкова . Чебоксары, 1976. С. 3 – 21.

52. Салимов, М.А. О наличии повышенной электронной температуры в пламенах углеводородных топлив/ М.А. Салимов // Электрофизика горения. Тез. докл., XIV Всесоюзн. сем. – Челябинск, 1991. С. 10.

53. Теплотехника: Учеб. для вузов/В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 1999. 671 с.

54. Кузнецов, А.А. О влиянии электрического поля на нагретую струю продуктов сгорания/ А.А. Кузнецов / Столетовские чтения, IX Всероссийская научно-методическая конференция по физике. ВлГПУ, Владимир. 2005. С. 169 – 172

55. Шпакович, Н.И. К вопросу о переносе электрических зарядов в струях, вытекающих из авиационных ГТД/ Н.И. Шпакович// Аэродинамика. 1973. Вып.8, Ч.1. С. 105 – 108.

56. Чень, Л. Электризация пыли при соударении/ Л. Чень, С.Л. Су. Механика, сб. переводов, 3/127. 1971.186 с.

57. Кузнецов, А.А. Пространственно-временные механизмы разделения электрических зарядов в пламени и нагретой струе метеорона/ А.А. Кузнецов // Термодинамика поверхностных явлений и адсорбции. Труды Всерос. сем. ИГХТУ, Иваново - Плес, 2006. С. 19 – 21.

58. Гейдон, А.Г. Пламя. Его структура, излучение и температура/ А.Г. Гейдон, Х.Г. Вольфгард: Пер. с англ. Н.С. Чернецкого /Под ред. С.А. Гольденберга. - М.: Гос. научн.-техн. изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1959. 330 с.

59. Левин, Л.М. О коагуляции заряженных облачных капель/ Л.М. Левин // ДАН СССР. Геофизика. Т.94, № 3. 1954. С. 467 – 470.

60. Левич, В.Г. Теория коагуляции и осаждения частиц аэрозоля в турбулентном потоке газа. О коэффициенте улавливания частиц аэрозоля/ В.Г. Левич // ДАН СССР. Физическая химия. Т. 99, № 6. 1954. С. 1041 – 1044.

61. Александров, М.С. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. Коллективная монография/ М.С. Александров, З.М. Бакленева, Н.Д. Гладштейн [и др.]. – М.: Наука, 1972. 196 с.

62. Ремизов, Л.Т. Естественные радиопомехи/ Л.Т. Ремизов. – М.: Наука. 1985. 200 с.

63. Кунин, В.Н. Эффекты, возникающие при приеме электромагнитного поля вблизи мощной тепловой струи / Кунин В.Н., Александров М.С., Конопасов Н.Г., Хаджи Б.А., Кузнецов А.А., Семенова Л.В., Шепилова Т.В., Терещенков В.П.// Геомагнетизм и аэрономия, АН СССР, Т.2. 1986. С. 359 – 361.

64. Андреева, М. И. Влияние флуктуационной составляющей на средний уровень вариаций E_z -составляющей в диапазоне частот ниже 0,1 Гц/ М.И. Андреева, Н.Г. Конопасов, А.А. Кузнецов [и др.] // Исследование, проектирование, испытание и эксплуатация информативно-измерительных устройств военной техники. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – М.: Изд-во РАН. 2010. С. 43 – 45.

65. Красногорская, Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения/ Н.В. Красногорская. – Л.: Гидрометеоиздат. 1972. 323 с.

66. Конопасов, Н.Г. О возможности воздействия на местное электрическое поле Земли мощной тепловой вертикальной струей/ Н.Г. Конопасов, З.Г. Шарина, А.А. Кузнецов // Радиопомехи КНЧ-диапазона и их природа. – Владимир: ВПИ. 1980. С. 29 – 33.

67. Кузнецов, А. А. Комплекс антенных устройств для регистрации вариаций напряженности электрического поля при работе установки метеотрон/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Антенны. 2010. № 8. С. 44 – 52.

68. Кузнецов, А.А. Связь между акустическими и электрическими свойствами пламени метеотрона/ А.А. Кузнецов, В.Н. Кунин, Н.Г. Конопасов // XVIII научн.-техн. конф. Тез.докл. – Владимир: ВПИ,1983. С.162.

69. Конопасов, Н.Г. О возможности активного воздействия на местное СНЧ электрическое поле мощной вертикальной струей/ Н.Г. Конопасов, В.Н. Кунин, А.А. Кузнецов [и др.]// Прием сверхнизкочастотных колебаний и устройства их обработки. Всесоюзн. конф. Тез. докл. – Воронеж: ВГУ,1983. С. 8 – 9.

70-71. Кузнецов, А.А. Исследование тепло- и электрофизических свойств мощной тепловой струи/ А.А. Кузнецов. Реферат дисс. канд. физ.-мат. наук. – Одесса: ОГУ. 1988. 16 с.

72. Кузнецов, А.А. Электрические эффекты в приземном слое атмосферы при работе тепловой установки метеотрон/ А.А. Кузнецов, В.Н. Кунин, Н.Г. Конопасов // Электрофизика горения, Тез. докл. XII Всесоюзн. сем., Караганда, 1989. С.74.

73. Кузнецов, А.А. Устройство приема вариаций напряженности электрического поля при работе метеотрона / А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 18 – 20.

74. Кузнецов, А.А. Определение знака избыточного заряда пламени ТУМ/ А.А. Кузнецов, О.Д. Бухарова // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. IV научн. конф. ученых России и Украины: Тез. докл. – Севастополь: СГТУ. 1995. С. 31 – 34.

75. Кондаков, В.П. Методика градуировки приемников КНЧ диапазона/ В.П. Кондаков, Л.В. Семенова, Л.В. Бобкова// Радиопомехи КНЧ диапазона и их природа. Рязань. РРТИ, 1976. С. 24 – 26.

76. Тверской, П.Н. Атмосферное электричество / П.Н. Тверской. Гидрометеиздат. – Л.: 1949. 252 с.

77. Кузнецов, А.А. Электрофизические процессы в системе зонд-плазма в пламени метеотрона/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Электрофизика горения. /Тез. докл.14 Всесоюз. сем. по электрофизике процессов горения: – Челябинск: ЧелГУ. 1991. С. 49.

78. Кузнецов, А. А. Электрофизические процессы в пламени метотрона и на металлической поверхности зонда / А.А. Кузнецов / Проблемы термодинамики поверхностных явлений и адсорбции: коллективная монография под. ред. О. И. Койфмана и М. В. Улитина. – Иваново: ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2009. С. 104 – 137.

79. *Smy P.R. Application of Langmuir probes for research of high pressure plasma / P.R. Smy // Adv. Phys. 1976. V. 25. P. 51.* (Смай П.Р. Применение зондов Лэнгмюра для исследования плазмы высокого давления. – М.: ВЦП, Пер. № Б-32169. 1979. 62 с.)

80. Кузнецов, А.А. Анализ электрической и газодинамической макроструктуры вертикальной тепловой струи метеотрона / А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов, В.Н. Кунин // Электрофизика горения. Тез. докл., XIII Всесоюзн.сем., Чебоксары, 1990. С. 31.

81. Гришин, А.М. Аперiodическая неустойчивость фронта верхового лесного пожара/ А.М. Гришин, Е.Е. Зеленский // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 5. С. 23 – 28.

82. Кузнецов, А.А. Пламя метеотрона – модель большого верхового пожара/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве. – Н. Новгород: НГТУ. 2003. С. 38

83. Кунин, В.Н. Устройство для геологоразведки/ В.Н. Кунин, Т.В. Шепилова. Положительное решение от 22.06.82 по заявке на изобретение № 3387266/25 от 25.01.82.

84. Дорожков, В.В. Комплекс устройств для создания и регистрации электромагнитных полей в СНЧ диапазоне/ В.В. Дорожков, А.А. Кузнецов // Методы и средства измерений. Часть 2., Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции, Н. Новгород. 2002. С. 4 – 5.

85. Тархов, А.В. Электроразведка: Справочник геофизика/ А.В. Тархов. – М.: Недра, 1979. 518 с.

86. Калашников, Н.И. Основы морской электроразведки/ Н.И. Калашников, Ф.Л. Дудкин, Ю.Б. Николаенко. – К.: Наукова думка, 1980. 280 с.

87. Импульсные системы большой мощности: пособие// Сб. статей: пер. с англ./ ред. д.т.н., проф.Э.И. Асиновского. М.: Мир, 1981. 247 с.

88. Шепилова, Т.В. Устройство для градуировки приемников КНЧ диапазона/ Т.В. Шепилова, В.Н. Кунин, В.П. Терещенков [и др.] // Прием и анализ сверхнизко-частотных колебаний. Тезисы докладов всесоюзной школы. – Владимир. ВПИ. 1980. с.11.

89. Дорожков, В.В. Регистрация электрических неоднородностей среды/ В.В. Дорожков, А.А. Кузнецов// Методы и средства измерений. Часть 2. Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Нижний Новгород: НГТУ. 2002. С. 21.

90. Кузнецов, А.А. Экспериментальное моделирование факелов горящих газовых и нефтяных скважин. Тепловые установки метеотрон II и III/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Инженерная физика. 2008. № 3. С. 20 – 24.

91. Кузнецов, А.А. Экспериментальное исследование динамической структуры вертикального факела пламени при работе метеотрона III/ А.А. Кузнецов// Физика аэродисперсных систем. – Украина. Одесса.: ОНУ. 2008. Вып. 45. С. 55 – 66.

92. Кузнецов, А.А. Экспериментальные исследования кольцевых вихрей продуктов сгорания в свободной атмосфере/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Физика аэродисперсных систем. № 42. Одесса. Украина. ОНУ. 2005. С. 100 – 106.

93. Конопасов, Н. Г. Экспериментальное исследование структуры и взаимодействия вихревых колец в свободной атмосфере/ Н.Г. Конопасов, А.А. Кузнецов, В.Н. Кунин // Физико-математические основы индустрии наносистем и материалов. Труды ВлГУ. Вып. 7. Владимир. 2010. С. 45 – 49.

94. Малецки, И. Генерирование и восприятие инфразвуков (Обзор)/ И. Малецки / ВЦП Пер.№ 15778, Харьков, 1979. 23 с. (*Malecki I. Generacja i percepcja infradźwięków, Archiwum akustyki, V. 10, No 2, 1975. P. 101 – 107*)

95. Исакович, М.А. Инфразвук. Обзор (до 1978)/ М.А. Исакович, М.Е. Шмакова. – М.: ГММТВ, 1978. 94 с.
96. *Posmentier. 1-16 Hz infrasound associated with clear air turbulence/ Posmentier// J. Geophys. Res., V. 79, No 12, 1974. P. 1755 – 1760.*
97. *Re Velle, D.O. Meteor-generated infrasound/ D.O. Re Velle // Science. V.189, No 4200. 1975. P. 394 – 395.*
98. *Bohannon, J.L. Detection of infrasonic pulses from thunder clouds/ J.L. Bohannon, A.A.Few, A.J. Dessler // Geophysical Research Letters, V. 4, No 1, 1977. P. 49 – 52.*
99. *Meecham. On aerodynamic infrasound/ Meecham // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1971, V. 33, № 2. P. 149 – 155.*
100. Голицын, Г. С. Акустико-гравитационные волны в атмосфере (Обзор данных наблюдений и теории)/ Г.С. Голицын, Е.П. Чунгузов // ФАО, 1974, Т. 10, № 3, с. 289 – 290.
101. Гостинцев, Ю.А. Волновые возмущения атмосферы при больших пожарах// Ю.А. Гостинцев, Е.А. Иванов, Н.П. Копылов [и др.] //Физика горения и взрыва, 1983, т. 19, № 4. С. 62 – 64.
102. Гупта, А. Закрученные потоки/ А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред: Пер.с англ. – М.: Мир, 1987. 588 с.
103. *Lighthill, M.J. On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound/ M.J. Lighthill. Proc. Roy. Soc. A 222, 1, 1954. P. 1 – 32;*
104. *Bragg, S. L. Combustion noise/ S. L. Bragg // Journal of the Institute of Fuel, XXXVI, 264,1963. P.12 – 16.*
105. Кузнецов, А.А. Акустические возмущения вблизи турбулентного пламени и вертикальной нагретой струи продуктов сгорания/ А.А. Кузнецов, В.В. Дорожков // Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тез.докл. XVIII междунар. сем. СПб, 2000. С.162.
106. Абугов, Д.И. Звуковой шум турбулентного пламени/ Д.И. Абугов, О.И. Обрезков // ФГВ, 1978, Т.14, №5. С. 63 – 71.

107. Грачев, А.И. Экспериментальные исследования распространения инфразвуковых волн вдоль земной поверхности/ А.И. Грачев, М.И. Мордухович, А.И. Обухов// Тез. докл. X Всесоюзн. акустич. конф. – М. 1983. С. 45 – 88.

108. Гостинцев, Ю.А. Инфразвуковые и внутренние гравитационные волны в атмосфере при больших пожарах/ Ю.А. Гостинцев, Е.А. Иванов, Ю.В. Шацких// Докл. АН СССР, 1983, т.271, № 2. С. 327 – 330.

109. Гостинцев, Ю.А. Горение нефти на водной поверхности (крупномасштабный эксперимент)/ Ю.А. Гостинцев, Н.П. Копылов, Л.А. Суханов [и др.]// Физика горения и взрыва, 1983, т. 19, № 4. С. 36 – 39.

110. Кузнецов, А.А. Метеотрон: монография. В 4 кн. Кн. 4. История создания. Дневник опытов. Фотоальбом / А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов; Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2020. 204 с. (в печати)

111. Кузнецов, А.А. Регистрация вариаций напряженности электрического поля в СНЧ диапазоне/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Методы и средства измерений. Матер. V ВНТК (*Computer-Based Conference*). Н. Новгород, 2002. С. 4 – 5.

112. Кузнецов, А.А. Исследования электрических процессов в пограничном слое методом локального возмущения/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Пятая российская конференция по атмосферному электричеству. Сб. научных трудов. Т. 1. ВлГУ, Владимир. 2003. С. 144 – 147

113. Кузнецов, А.А. Динамика макропроцессов в пламени и нагретой струе/ А.А. Кузнецов, О.Д. Бухарова// Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 1. С. 35 – 41.

114. Кузнецов, А.А. О формировании собственного электрического поля крупномасштабного пламени и тепловой струи/ А.А. Кузнецов, О.Д. Бухарова // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. Материалы VII международной науч.-техн. конф. СГТУ. Севастополь, 1998. С. 13.

115. Ардашников, В.Л. Программное обеспечение перевода графических реализаций непрерывных физических процессов в адекватные таблицы массивов дискретных переменных/ В.Л. Ардашников, О.Д. Бухарова, А.А. Кузнецов // Теплоэлектрофизические явления в атмосфере и электромагнитное поле Земли при глобальных процессах./ Под ред. В.С. Плешивцева. ВлГУ. Владимир, 1999. С. 41.

116. Кузнецов, А.А. Компьютерное отображение и анализ графических диаграмм процессов/ А.А. Кузнецов, А.В. Сивко// Информационные технологии в науке, проектировании и производстве. Часть 2., Материалы четвертой Всероссийской научно-технической конференции (*Computer-Based Conference*), Н.Новгород, НГТУ. 2002. С. 17.

117. Кузнецов, А.А. Компьютерное отображение графических диаграмм процессов/ А.А. Кузнецов // Исследование тепло- и электрофизических явлений в атмосфере. Отчет каф. Общей и прикладной физики по теме г/б НИР № 271/96 за 2001 – 2006 гг. Науч. рукль проф. Кунин В.Н., Владимир, ВлГУ. 2000. С. 68 – 78.

118. Чайлдс, Д. Дж. Кепстр и его применение при обработке данных. Обзор/Д. Дж. Чайлдс/ ТИИЭР, Т. 65, № 10. 1977. С. 5 – 23.

119. Розенберг, Г.В. Фоновый аэрозоль/ Г.В. Розенберг, Ю.С. Любовцева, Г.И. Горчаков// Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Доклад на междунар. симп. Т. 3. – М.-Л.: Гидрометеоиздат, 1977. С. 156 – 163.

120. Розенберг, Г.В. Покровная фаза аэрозоля и ее роль в атмосфере/ Г.В. Розенберг // Физика атмосферы и океана. 1979. Т. 15, № 10. С. 1094 – 1097.

121. Кузнецов, А.А. Экспериментальные исследования механизмов генерации пламенем и нагретой струей акустических и электрических колебаний/ А.А. Кузнецов, В.В. Дорожков// Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тез.докл. XVIII междунар. сем. СПб, 2000. С.146.

122. Кузнецов, А.А. Ионно-конвекционный генератор на сажевых частицах/ А.А. Кузнецов, В.Н. Кунин, Н.Г. Конопасов // Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем. /Тез. докл. XV Всесоюз. конф. Т.2. – Одесса: ОГУ. 1989. С. 156.

123. Гостинцев, Ю.А. Конвективная колонка над линейным пожаром в однородной изотермической атмосфере)/ Ю.А. Гостинцев, Л.А. Суханов // Физика горения и взрыва, 1977, т. 13, № 5. С. 675 – 685.

124. Гостинцев, Ю.А. Конвективная колонка над линейным пожаром в политропической атмосфере)/ Ю.А. Гостинцев, Л.А. Суханов // Физика горения и взрыва, 1978, т. 14, № 3. С. 3 – 8.

125. Бабат, Г.И. Ионно-конвекционные генераторы постоянного и переменного тока/ Г.И. Бабат // Журнал технической физики, 1936, Т. 6, вып. 8, ОНТИ, С. 1319 – 1333.

126. Кузнецов, А.А. Свободная естественно-конвективная струя продуктов сгорания как ионно-конвекционный генератор на сажевых частицах/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. Матер. IX междунар. науч.-техн. конф. СевГТУ, Севастополь, 2000. С.82 – 87.

127. Кузнецов, А.А. Положительная поверхностная ионизация адатомов калия на частицах сажи/ А.А. Кузнецов // Термодинамика поверхностных явлений и адсорбции, Материалы работ Всероссийск. сем., ИГХТИ, Иваново, 2002. С. 4 – 7.

128. Кузнецов, А. А. Воздействие струи метеотрона на электрические поля в земле/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Информационные и лазерные технологии. Вопросы теории, практики и производства. Труды ВлГУ. Вып. 10. Владимир. 2014. С. 27 – 31.

129. Кузнецов, А.А. Эффект смены знака корреляций электрических и гидродинамических колебательных процессов при работе метеотрона/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Электрофизика горения. /Тез. докл. 14 Всесоюз. сем. по электрофизике процессов горения. – Челябинск: ЧелГУ, 1991. С. 12.

130. Кузнецов, А.А. Акустические волны в диапазоне низких частот/ А.А. Кузнецов // Вибрационные машины и технологии. Сб. науч. трудов в 2-х частях. Часть 1: Материалы VII МНТК «Вибрация-2005». – Курск: КГТУ, 2005. С. 234 – 238.

131. Кузнецов, А.А. Акустические шумы, генерируемые турбулентным пламенем метеотрона в окружающем пространстве/ А.А. Кузнецов, О.Д. Бухарова// Прикладные проблемы механики жидкости и газа. IV научн. конф. ученых России и Украины. Тез. докл. СГТУ. Севастополь, 1995.

132. Кузнецов, А.А. Акустические шумы, генерируемые турбулентным пламенем метеотрона в окружающем пространстве/ А.А. Кузнецов, О.Д. Бухарова // VII Столетовские чтения: Тез. докл. - Владимир, 1996. С. 31.

133. Кузнецов, А.А. Метеотрон – генератор электрических и акустических колебаний/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // 16 конф. СНГ по вопросам исследования горения и газовой динамики дисперсных систем: Тез. докл. - Украина, Одесса: ОГУ, 1993. С. 77.

134. Кузнецов, А.А. Генерация акустических СНЧ колебаний тепловым источником/ А.А. Кузнецов // Вибрационные машины и технологии, V междунар. науч.- технич. конф. «Вибрация – 2001». – Курск: КГТУ, 2001. С. 362 – 366.

135. Гостинцев, Ю.А. О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами/ Ю.А. Гостинцев, Е.А. Иванов, С.В. Анисимов [и др.] // Докл. АН СССР, 1985, т. 283, № 3. С. 573 – 576.

136. Кузнецов, А.А. Акустические колебания, генерируемые крупномасштабным пламенем метеотрона/ А.А. Кузнецов, В.Н. Кунин, Н.Г. Конопасов // Электрофизика горения. Тез. докл., XII Всесоюзн. сем. – Караганда: ХМИ АН КазССР. 1989. С.86.

137. Конопасов, Н.Г. Приемник инфразвука/ Н.Г. Конопасов, А.А. Кузнецов, В.Н. Кунин. – Деп. ВИНТИ №1548. 82, 4 с.

138. Шипилов, О.И. Исследование вертикальной турбулентной струи и сжимаемого газа/ О.И. Шипилов // Труды ИПГ. – М.: Гидрометеоздат, 1984. Вып. 55. 76 с.

139. Ландау, Л.Д. Механика сплошных сред/ Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. - М.: Госиздат техн-теор. лит., 1954. 795 с.

140. Биркгоф, Г. Струи, следы и каверны/ Г. Биркгоф, Э. Сарантонелло: Пер. с англ. Под ред. Г.Ю. Степанова. – М.: Мир, 1964. 468 с

141. Кузнецов, А.А. Связь между акустическими и электрическими свойствами пламени метеотрона / А.А. Кузнецов, В.Н. Кунин, Н.Г. Конопасов // XVIII научн.-техн. конф.: Тез.докл.,ВПИ, Владимир. 1983, С.162.

142. Кузнецов, А.А. Осесимметричная нагретая струя как суперпозиция вихревых макроструктур/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Дисперсные системы. Материалы XXV научной конференции. – Украина, Одесса: ОНУ.: 2012. С. 143 – 144.

143. Терещенков, В.П. Исследование помеховой обстановки под землей и под водой/ В.П. Терещенков, В.Н. Кунин, Л.В. Семёнова [и др.]// Сб. статей. Радиопомехи КНЧ диапазона и их природа. Рязань, РРТИ, 1976. С. 53 – 66.

144. Кузнецов, А.А. Наземная и подземная регистрации вариаций напряженности электрического поля при работе/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Методы и средства измерений. Материалы VII ВНТК. Н. Новгород. 2003. С. 12

145. Конопасов, Н.Г. Приемник инфразвуковых колебаний/ Н.Г. Конопасов, А.А. Кузнецов. ВПИ, Владимир, 1982. 4с. (Деп.2 апр. 1982, № 1548-82 Деп. в ВИНТИ)

146. Кузнецов, А.А. Установка для создания влажной струи/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов// Прикладные проблемы механики жидкости и газа. Материалы X международной науч.-техн. конф. – Севастополь: СГТУ. 2001. С. 114 – 116.

147. Конопасов, Н.Г. Установка генерации водно-капельных потоков/ Н.Г. Конопасов, А.А. Кузнецов// Информационно- измерительные и управляющие системы военной техники. Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – М.: Изд-во РАРАН. 2014. С. 64 – 66.

148. Кузнецов, А. А. Устройство приема вариаций напряженности электрического поля при работе метеотрона / А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 18 – 20.

149. Винниченко, Н.К. Турбулентность в свободной атмосфере/ Н.К. Винниченко, Н.Э. Пинус, С.М. Шметер [и др.]. – М.: Гидрометеиздат, 1976. 287 с.

150. Кузнецов, А.А. О спектрах пульсаций скорости в струе метеотрона / А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Современные проблемы математики и естествознания. Матер. VII ВНТК. НГТУ, Н. Новгород. С. 2

151. Акимов, М.Н. Спектр электрических зарядов капель тумана/ М.Н. Акимов // Атмосферное электричество. Труды ГГО. Вып. 177. – Л.: Гидрометеиздат. 1965. С. 76 – 80.

152. Сергеева, А.П. Об электрических зарядах облачных частиц/ А.П. Сергеева // Изв. АН СССР, сер. геофиз. № 3. 1958.

153. Кацыка, А.П. Электрические заряды капель облаков и туманов/ А.П. Кацыка, Л.Г. Махоткин, Г.Д. Петров [и др.]// Изв. АН СССР, сер. геофиз. № 1. 1961.

154. Беляев, С.П. Исследование характеристик вертикальной аэродинамической трубы/ С.П. Беляев, П.И. Захарюженков, В.М. Ким [и др.] // Труды ИЭМ. Вып. 14 (59). 1976. С. 60 – 66.

155. Климин, Н.Н. Распределение зарядов капель, образующихся при распылении воды/ Н.Н. Климин // Атмосферное электричество. Труды ГГО. Вып. 498. – Л.: Гидрометеиздат. 1986. С. 25 – 31.

156. Розенберг, Г.В. Возникновение и развитие атмосферного аэрозоля - кинетически обусловленные параметры/ Г.В.Розенберг // Физика атмосферы и океана. 1983. Т.19, №1. С. 21 – 35.

157. Кузнецов, А.А. Некоторые характеристики приземного аэрозоля/ А.А. Кузнецов// Дисперсные системы. Материалы XXVII Международной научной конференции. – Украина. Одесса: ОНУ. 2016. С.130 – 131.

158. Мордовина, Л.С. Заряд частиц осадков/ Л.С. Мордовина // Атмосферное электричество. – Труды ГГО. Вып. 358. – Л.: Гидрометеиздат. 1975. С. 155 – 158.

159. Махоткин, Л.Г. Об изменении зарядов капель при испарении/ Л.Г. Махоткин // Вопросы атмосферного электричества. Труды ГГО. Вып. 97. – Л.: Гидрометеиздат. 1960. С. 48 – 50.

160. Фукс, Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде/ Н.А. Фукс // Итоги науки. Физико-математические науки 1. – М.: АН СССР. 1958. 93 с.

161. Натансон, Г.Л. Флуктуации плотности зарядов в растворах электролитов/ Г.Л. Натансон // ДАН СССР. 1946. Т.53, № 2. С. 119 – 122.

162. Мучник, В.М. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере/ В.М. Мучник, Б.Е. Фишман. – Л.: Гидрометеиздат. 1982. 208 с.

163. Кузнецов, А.А. К оценке натурной электризации капель воды/ А.А. Кузнецов // Дисперсные системы. Материалы XXVII Международной научной конференции. – Украина. Одесса: ОНУ. 2016. С.128 – 129.

164. Кузнецов, А.А. Анализ вариантов увлажнения вертикальной нагретой струи метеотрона. Постановка задачи 1 / А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов// Дисперсные системы. Материалы XXVIII Международной научной конференции. – Украина. Одесса: ОНУ. 2018. (в печати)

165. Кузнецов, А.А. Метеотронный комплекс генерации нагретой влажной струи/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов// Физическая химия поверхностных явлений и адсорбции. – Иваново-Плес: Изд-во ИХТУ. 2013. С. 28 – 34.

166. Кузнецов, А.А. Генерация носителей электрического заряда малой подвижности/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Физика аэродисперсных систем. Межведомственный научный сборник. – Украина. Одесса: Изд-во ОНУ. 2014. Вып. 51. С. 79 – 86.

167. Кузнецов, А.А. Установка для создания мощных вертикальных нагретых струй/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. СевГТУ, Севастополь, 2001. С. 116 – 122.

168. Кузнецов, А.А. Процессы ионизации в крупномасштабном пламени/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов// Прикладные проблемы механики жидкости и газа. Матер. IX междунар. науч.-техн. конф. СевГТУ. Севастополь. 2000. С. 74 – 79.

169. Кузнецов, Эксперименты по генерации водного аэрозоля/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Дисперсные системы. Материалы XXVII Международной научной конференции. – Украина. Одесса: ОНУ. 2016. С.134 – 135.

170. Конопасов, Н.Г. Испытание противопожарной техники и снаряжения при работе метеотрона/ Н.Г. Конопасов, А.А. Кузнецов// Физическая химия поверхностных явлений и адсорбции. Труды V научной конф. - Иваново-Плес: ФГБОУВПО ИХТУ. 2014. С. 45 – 47.

171. Кузнецов, А.А. Вертикальный транспорт водяного пара нагретой струей метеотрона до уровня слоя инверсии/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов, З.Г. Конопасова// Дисперсные системы. Материалы XXVII Международной научной конференции. – Украина. Одесса: ОНУ. 2016. С.139 – 141.

172. Кузнецов, А.А. Зондовая диагностика пламени метеотрона/ А.А. Кузнецов // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 3. С. 39 – 49.

173. Дорожков, В.В. Система устройств генерации и излучения электромагнитного поля в КНЧ диапазоне/ В.В. Дорожков, А.А. Кузнецов, Т.В. Шепилова // Пятая российская конференция по атмосферному электричеству. Сборник научных трудов. Том 2. Владимир. 2003. С. 155 – 156.

174. Натансон, Г.Л. Электризация капель при распылении жидкостей как результат флуктуаций в распределении ионов/ Г.Л. Натансон // Журнал физической химии. 1949. Т. 23, № 3. С. 304 – 314.

175. Кузнецов, А. А. О механизмах электрической зарядки струи метеотрона// А.А. Кузнецов // Физическая химия поверхностных явлений и адсорбции. – Иваново-Плес: ФГБОУВПО ИХТУ. 2012. С. 6 – 11.

176. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика: учеб. пособие для вузов/ Д.В. Сивухин. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Наука. ГРФМЛ. 1990. 592 с.

177. Конопасов, Н.Г. Электризация водно-капельного потока I/ Н.Г. Конопасов, З.Г. Конопасова, А.А. Кузнецов// Дисперсные системы. Материалы XXVII Международной научной конференции. – Украина. Одесса: ОНУ. 2016. С.107 – 108.

178. *Herdan, G. Small particle statistics/ G. Herdan. – Butterworths. Oxford U.K. 1960. P. 440*

179. Конопасов, Н. Г. Моделирование электризации водно-капельного потока/ Н.Г. Конопасов, А.А. Кузнецов // Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники. Материалы IV Всероссийской научно- технической конференции. – М.: Изд-во РАН. 2014. С. 63 – 64.

180. Бюннинг, Э. Ритмы физиологических процессов (Физиологические часы)/ Э. Бюннинг: пер. с нем. под ред. И.И. Гунара. – М.: ИЛ. 1961. 184 с.

181. Биологические часы: пер. с англ. под ред. С.Э. Шноля. – М.: Мир. 1964. 694 с.

182. Биологические ритмы: 2-х томах. Т. 1. Пер. с англ. / под ред. Ю. Ашоффа. – М.: Мир, 1984. 414 с
183. Глас, Л. От часов к хаосу. Ритмы жизни/ Л. Глас, М. Мэки. – М.: 1991. 145 с.
184. Добрецов, Л.Н. Эмиссионная электроника/ Л.Н. Добрецов, М.В. Гомоюнова. – М.: Наука. 1966. 564 с
185. Кузнецов, А.А. Движение воздуха в приземном слое при работе метеотрона/ А.А. Кузнецов, О.Д. Бухарова // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. /Тез. докл. III научн. конф. ученых России и Украины. – Севастополь: СГТУ.1994. С. 29.
186. Аршинов, А.А. Частицы как стабилизаторы концентрации электронов/ А.А. Аршинов, А.К. Мусин// ЖФХ. 1959. Т. 33, вып. 10.
187. Елецкий, А.В. Кинетика предпробойных явлений в атмосферном воздухе/ А.В. Елецкий, Б.М. Смирнов// ЖТФ. 1991.Т. 61, вып. 10. С.70 – 75.
188. Ушаков, В.В. Экспериментальное исследование электрогазодинамических генераторов заряженных аэрозольных частиц/ В.В. Ушаков, Г.М. Франчук // Аэродинамика. – Киев: 1973. Вып. 8. Ч. 1. С. 68 – 71.
189. Капцов, Н.А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах/ Н.А. Капцов. – М.: Гостехиздат. 1947. 225 с.
190. Левитов, В.И. Корона переменного тока/ В.И. Левитов. – М.: Энергия. 1975. 280 с.
191. Имянитов, И.М. Электризация самолетов в облаках и осадках/ И.М. Имянитов. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. 145 с.
192. *Chapman, S. Corona Point Current in Wind/ S. Chapman // Journal of Geophysical research. 1970. V. 75 № 12. P. 2165.*
193. Ратников, Э.В. Влияние скорости воздушного потока на вольтамперную характеристику короны/ Э.В. Ратников // Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук.1971, № 1.

194. Дунский, В.Ф. Индукционный способ униполярной электризации при образовании аэродисперсных систем/ В.Ф. Дунский// Коллоидный журнал. 1966. XXVIII, № 1.

195. Виснапу, Л.Ю. О создании заряженных аэрозолей в камерах/ Л.Ю. Виснапу, Я.Ю. Рейнет// Ученые записки Тартуского государственного университета. 1970. Вып. 240.

196. Кузнецов, А. А. К применению ЭГД генератора для электризации вертикальной нагретой струи метеотрона// А.А. Кузнецов // Дисперсные системы. Материалы XXVII Международной научной конференции. – Украина. Одесса: ОНУ. 2016. С.132 – 133.

197. Кузнецов, А.А. Эксперименты по образованию облаков/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов, З.Г. Конопасова// Дисперсные системы. Материалы XXV научной конференции. – Украина, Одесса: ОНУ. 2012. С. 149 – 150.

198. Дитяткин, Ю.Ф. Распыливание жидкостей/ Ю.Ф. Дитяткин, А.А. Клячко, Б.В. Новиков [и др.]. – М.: Машиностроение. 1977. 206 с.

199. Гутман, Л.Н. Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов/ Л.Н. Гутман. Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. 295 с.

200. *Morton, B.R.. Forced plumes/ B.R. Morton// J. of Fluid mechanics, 1959, V.5, №1, P.151 – 163.*

201. *Morton, B.R. The ascent of turbulent forced plume in a calm atmosphere/ B.R. Morton // International J. of air Pollution, 1959, V.1, №3, P.184 – 197.*

202. Кузнецов, А.А. «Вихревая модель» затопленной осесимметричной нагретой струи/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Физика аэродисперсных систем. 2012. Вып. 49. – Украина, Одесса: ОНУ. С. 82 – 89.

203. Кузнецов, А.А. О возможных воздействиях теплового источника на окружающую среду/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Современные проблемы математики и естествознания. – Н. Новгород: НГТУ. 2003. С. 1

204. Кузнецов, А.А. К модели поведения приземного аэрозоля при работе метеотрона/ А.А. Кузнецов //16 конф. СНГ по вопросам исследования горения и газовой динамики дисперсных систем: Тез. докл. ОГУ, Украина, Одесса, 1993. С. 78.

205. *Pollak L.W. Counting of Aitken Nuclei and Applications of the Counting Results/ Int. J. Air Poll. Pergamon Press, 1959, Vol. 1, P. 293 – 306.*

206. Кузнецов, А.А. Методика анализа текущей помеховой обстановки в крайне-низкочастотном диапазоне/ А.А. Кузнецов. «Интеграция мировой науки в условиях кризиса: теоретические подходы и практические результаты: материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции (28 марта 2019 г.): в 2-х ч. Ч.2. – Ростов-на-Дону: изд-во Южного университета ИУБиП, 2019. С. 162 – 165.

207. Седов, Л.И. Механика сплошной среды. В 2-х томах, Т.1. 4-е изд/ Л.И. Седов. – М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы.1983. 528 с.

208. Кумагаи, С. Горение: (пер. с яп.)/ С. Кумагаи. – М.: Химия, 1979. 255 с

209. Кузнецов, А.А. Изменение вектора скорости ветра при работе установки метеотрон/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Теплофизические измерения в начале XXI века, Ч. 1. Тез. докл. IV Междунар. теплофиз. шк., ТГТУ, Тамбов. 2001. С. 101 – 103.

210. Лепендин, Л.Ф. Акустика / Л.Ф. Лепендин. – М.: Высшая школа. 1978. 448 с

211. Скучек, Е. Основы акустики. В 2-х томах. Т.2/ Е.Скучек / Пер. с англ. /Под ред. Л. М. Лямшева. – М.: Мир,1976. 542 с.

212. *Johhson, E.O. A floating double probe method for measurements in gas discharges/ E.O. Johhson, L.A. Malter// Physical Review,`1950, V. 80, № 1, P.58 – 68.*

213. Борьба с шумом на производстве. Справочник/ Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. 400 с.

214. Кузнецов, А.А. О возможных воздействиях теплового источника на окружающую среду/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Современные проблемы математики и естествознания. – Н. Новгород: НГТУ. 2003. С. 1

215. Кузнецов, А.А. Эксперимент по одновременной регистрации акустических и электрических возмущений вблизи турбулентного пламени и нагретой струи/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. Материалы IX международной науч.-техн. конф. СевГТУ, Севастополь. 2000. С. 70 – 73.

216. Кузнецов, А.А. Генерация носителей электрического заряда малой подвижности/ А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов, З.Г. Конопасова // Дисперсные системы. Материалы XXVII Международной научной конференции. – Украина. Одесса: ОНУ. 2016. С. 136 – 138.

Научное издание

КУЗНЕЦОВ Артемий Артемьевич
КОНОПАСОВ Николай Георгиевич

МЕТЕОТРОН

Монография

Книга 3 (Доп.)

Эксперименты. Регистрации. Моделирование. Анализ

Компьютерная верстка А. А. Кузнецова

Издается в авторской редакции

Подписано в печать 09.01.20.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 14,88. Тираж 200 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.