

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Российский научно-исследовательский институт информации
и технико-экономических исследований по инженерно-техническому
обеспечению агропромышленного комплекса»
(ФГБНУ «Росинформагротех»)

**ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИСПЕРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАСПЫЛИТЕЛЕЙ МАШИН
ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ**

Научное издание

Москва 2021

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Российский научно-исследовательский институт информации
и технико-экономических исследований по инженерно-техническому
обеспечению агропромышленного комплекса»
(ФГБНУ «Росинформагротех»)



ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИСПЕРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАСПЫЛИТЕЛЕЙ МАШИН ДЛЯ
ХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

Научное издание



Москва 2021

Техника и оборудование для села

Сельхозпроизводство • Переработка • Агротехсервис • Агробизнес

ЖУРНАЛ

«ТЕХНИКА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СЕЛА» – ВАШ ПОМОЩНИК В НАУЧНОЙ, ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ, УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ И УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ!

Ежемесячный полнокрасочный научно-производственный и информационно-аналитический журнал «Техника и оборудование для села», учредителем и издателем которого является ФГБНУ «Росинформагротех», выпускается с 1997 г. при поддержке Минсельхоза России. За это время журнал стал одним из ведущих изданий в отрасли и как качественное и общественно значимое периодическое средство массовой информации в 2008, 2009 и 2011 гг. удостоен знака отличия «Золотой фонд прессы». В редакционный совет журнала входят 8 академиков РАН и один академик НАН Республики Казахстан.

В журнале освещаются актуальные проблемы технической и технологической модернизации АПК: инновационные проекты, технологии и оборудование, энергосбережение и энергоэффективность; механизация, электрификация и автоматизация производства и переработки сельхозпродукции; агротехсервис; аграрная экономика; информатизация в АПК; развитие сельских территорий; технический уровень сельскохозяйственной техники; возобновляемая энергетика и др.

Журнал является постоянным участником большинства международных и российских выставок, конференций и других крупных мероприятий в области АПК, проходящих в России, неоднократно отмечался почетными грамотами, дипломами и медалями (более 10).

Журнал включен в международную базу данных AGRIS ФАО ООН, Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, входит в ядро РИНЦ и базу данных RSCI.

Регионы распространения журнала: Центральный, Центрально-Черноземный, Поволжский, Северо-Кавказский, Уральский, Западно-Сибирский, Восточно-Сибирский, Северный, Северо-Западный, Калининградская область, а также государства СНГ (Украина, Беларусь, Казахстан).

Индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 42285.

Стоимость подписки на 2021 г. с доставкой по Российской Федерации – 9636 руб. с учетом НДС (10%).

Приглашаем разместить в журнале «Техника и оборудование для села» информационные (рекламные) материалы, соответствующие целям и профилю журнала.

Подписку и размещение рекламы можно оформить через ФГБНУ «Росинформагротех» с любого месяца, на любой период, перечислив деньги на наш расчетный счет.

Банковские реквизиты: УФК по Московской области (Отдел № 28 Управления Федерального казначейства по МО)

ИНН 5038001475/КПП 503801001

ФГБНУ «Росинформагротех», л/с 20486Х71280,

Единый казначейский счет 40102810845370000004

Казначейский счет 03214643000000014800 в ГУ Банка России

по ЦФО // УФК по Московской области, г. Москва, БИК 004525987

В назначении платежа указать

код КБК (000 0000 00000000 000 440), ОКТМО 46758000.

Адрес редакции: 141261, Московская обл., пос. Правдинский, ул. Лесная, 60,

Росинформагротех, журнал «Техника и оборудование для села».

Справки по телефонам: (495), 993-44-04, (496) 531-19-92;

E-mail: r_technica@mail.ru, fgnu@rosinformagrotech.ru



УДК 631.348:632.934.1

ББК 40.726

И 66

Рецензенты:

К.Л. Алексеева, д-р с.-х. наук, гл. науч. сотр. (ВНИИО – филиал ФГБНУ «ФНЦО»);

В.Ф. Воробьев, д-р с.-х. наук, гл. науч. сотр. отдела агротехнологий в садоводстве (ФГБНУ ФНЦ садоводства)

Под редакцией д-ра техн. наук, проф., акад. РАН **В.Ф. Федоренко**
и канд. физ.-мат. наук **Э.Г. Аристова**

И 66 **Федоренко В.Ф., Аристов Э.Г., Краховецкий Н.Н., Селиванов В.Г., Береговенко С.А., Веретенников Ю.М. Инновационные методы исследования дисперсных характеристик распылителей машин для химической защиты растений: науч. изд. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. – 120 с.**

ISBN 978-5-7367-1651-7

Рассмотрен метод определения размеров капель распыла, базирующийся на инновационном способе восстановления первоначальных размеров капель. Представлена разработанная авторами технология отбора пробы капель из факела распыла и компьютерная программа распознавания, измерения диаметров и математической обработки репрезентативной выборки из генеральной совокупности капель распыла. Показаны особенности экспериментального стенда, позволяющего моделировать различные режимы диспергирования капель водного аэрозоля и измерять его численные характеристики. Приведены результаты экспериментальных исследований по сравнительному тестированию дисперсных характеристик и пространственной неоднородности факела распыла для трех однотипных форсунок различных производителей.

Предназначено для научных работников и специалистов агропромышленного комплекса, специалистов машинно-испытательных станций Минсельхоза России, разработчиков и изготовителей машин для химической защиты растений, преподавателей и студентов высших учебных заведений сельскохозяйственного профиля, сельхозтоваропроизводителей.

Fedorenko, V.F., Aristov, E.G., Krakhovetsky, N.N., Selivanov, V.G., Beregovenko, S.A., Veretennikov, Yu.M. Innovative Methods of Research of Dispersed Characteristics of Chemical Plant Protection Machine Sprayers: A Scientific Edition (Moscow: Rosinformagrotekh) 120 (2021).

A method for determining the size of spray droplets based on an innovative method of restoring the original droplet sizes is described. The authors present a process for taking a sample of droplets from a spray cone and software for recognition, measurement of diameters and mathematical processing of a representative sample from the general population of spray droplets. The features of the experimental stand, which makes it possible to simulate various modes of dispersion of water aerosol droplets and measure its numerical characteristics, are shown. The results of experimental studies on comparative testing of dispersed characteristics and spatial heterogeneity of the spray pattern for three nozzles of the same type from different manufacturers are provided.

It is intended for scientists and specialists of the agribusiness, specialists of machine-testing stations of the Ministry of Agriculture of Russia, developers and manufacturers of machines for chemical plant protection, teachers and students of higher educational institutions of agricultural profile and agricultural producers.

УДК 631.348:632.934.1

ББК 40.726

ISBN 978-5-7367-1651-7

© ФГБНУ «Росинформагротех», 2021

ВВЕДЕНИЕ

В российском законодательстве создана правовая основа стимулирования экологической модернизации, энерго- и ресурсосбережения, снижения загрязнения окружающей среды, внедрения наилучших доступных технологий. Основопологающим актом в этой области является Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2016 г. № 350 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в интересах развития сельского хозяйства». В целях реализации этого указа была разработана и утверждена Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017-2025 годы, целью и задачей которой является в том числе разработка современных инновационных методов контроля качества сельскохозяйственной продукции.

Еще в 1964 г. Х. Грин и В. Лейн [1] сформулировали ключевую (но до сих пор нерешенную!) проблему, характеризующую состояние пока еще не состоявшейся фундаментальной науки «Физика промышленных аэрозолей». Эти авторы, в частности, констатировали: «Процесс распыления жидкостей интенсивно исследовался в связи с конструированием и эксплуатацией форсунок, широко используемых в промышленности, однако физические его основы еще не вполне выяснены и механизм распыления еще не поддается количественному теоретическому анализу. Это прискорбно, поскольку точное знание физики распыления имело бы не только научное, но и практическое значение, так как определило бы пути дальнейшего применения аэрозолей в промышленности, медицине и сельском хозяйстве».

К сожалению, несмотря на известные научно-технические открытия и технологические достижения, практически все существующие в мире технологии генерирования, измерения и применения промышленных аэрозолей все еще остаются на уровне 60-х годов XX в.

В настоящее время в мире используется огромное количество форсунок и распылителей. Однако человек до сих пор не научился математически точно измерять размеры (объемы), скорость дви-

жения капель распыляемых жидкостей и тем более регулировать их дисперсность. А без точного определения и регулирования этих характеристик невозможно оптимизировать конструкции распылительных устройств для радикального сокращения технологических потерь материальных ресурсов.

Развитие «Физики промышленных аэрозолей» (как современной науки) продолжает базироваться на традиционных испытательных технологиях 60-х годов XX в. Сказанное относится к способам оценки распределения числа (количества) капель по размерам и «среднего» значения их размера (d_{cp}). Недостатки подобной системы испытаний осознаются и международными экспертами. Так, согласно действующему стандарту ИСО и международному ГОСТу [2], подобное «испытание обеспечивает только минимальную точность, поэтому оно будет пересмотрено при совершенствовании технологии определения размера капель». Поэтому одной из главных нерешенных задач (от реализации которой зависит успешное решение обсуждаемой проблемы) является внедрение в промышленное производство принципиально новых, стандартизированных методов регистрации и максимально точного определения количественных показателей дисперсного состава капель.

За последние 10-15 лет в практику сельского хозяйства все больше и больше внедряются современные биологически суперактивные препараты с низкими (5-30 г/га) нормами расхода. Для их внесения непригодны применяемые в мире опрыскивающие машины и агротехнологии. Поэтому скорость поступления в природу всех ядов, участвующих в процессах химических защитных мероприятий, все более опережает скорость детоксикации этих ядов природой.

Отсутствие учебника по теоретическим, методическим основам и правилам применения химических, биологических средств защиты и регуляторов роста растений в России и мире определяет абсолютное непонимание физической сущности фундаментальных вопросов даже специалистами всех категорий на всех уровнях. И, как следствие, независимо от применяемых в мире методов, способов и агротехнологий, потери пестицидов из-за сноса ветром и стекания их на почву в реальном сельскохозяйственном производстве могут

достигать 70-90%, а пищевые продукты и корма содержат микро-остатки ядов в достаточно опасных концентрациях.

Оптимизация расходных характеристик препаратов при сохранении эффективности их действия возможна только при условии единых, согласованных действий всех научно-производственных предприятий, участвующих в элементах технологического цикла мероприятий по химической защите. К ним относятся химические компании, занимающиеся разработкой и изготовлением препаратов; предприятия, конструирующие и изготавливающие распылительные механизмы; инженерные предприятия, выпускающие машины химической защиты растений. Необходимо разработать и создать распылительные механизмы, генерирующие аэрозоль требуемых размеров. На этой основе определяются количественные значения концентрации препарата, а следовательно, и расходные характеристики. Эти данные, в свою очередь, формируют новые требования к распылительной технике, предназначенной для работы с широким спектром препаратов.

Создание конструкций распылительной техники с регулируемой дисперсными характеристиками – основа для разработки про-рывных, экологически рациональных, ресурсосберегающих технологий в АПК. Они открывают реальную возможность снижения экотоксикантной нагрузки на агроценозы, среду обитания человека и существенного сокращения удельного расхода агрохимикатов. Таким образом, одно из наиболее важных условий успеха в деле оптимизации агрохимических технологий для защиты растений – создание распылительных устройств под конкретные химические препараты, нормы их расхода на единицу площади, опрыскивающую технику и сельскохозяйственные технологии. Необходимо также предусмотреть возможность настройки и регулирования этой техники применительно к погодным условиям на момент проведения агрохимических работ. На базе новой техники следует разрабатывать новые, научно обоснованные агрохимические технологии опрыскивания, дифференцируя их по видам сельскохозяйственных культур, вредоносным биологическим объектам, пестицидам, распыливающим устройствам и нормам расхода пестицидов на единицу площади.

Однако конструирование новой распылительной техники или оптимизация существующей возможны при наличии надежной технологии количественного тестирования распылительных механизмов. Дисперсный состав капель, образующихся при работе машин химической защиты растений, определяет эффективность их действия на составляющие технологического цикла. Чтобы оптимизировать процесс в целом, необходимо максимально точно измерить дисперсные характеристики отдельной форсунки, распылительного механизма. При этом следует учесть, что дисперсные параметры каждой отдельной форсунки с точки зрения ее прикладного назначения характеризуются:

- геометрией факела распыла (габариты и форма факела);
- структурой факела распыла.

Только после анализа этих параметров можно переходить к определению дисперсных характеристик исследуемой форсунки.

ГЛАВА I. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ХИМИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Безопасность применения пестицидов и агрохимикатов должна обеспечиваться соблюдением установленных регламентов и правил, исключающих их негативное воздействие на здоровье людей и окружающую природную среду.

Пестициды и агрохимикаты применяются только при использовании специальной техники и оборудования (статья 22 ФЗ № 109 от 19 июля 1997 г.). Но создание «специальной распылительной техники и оборудования» требует нового подхода к методике ее испытаний и определению дисперсного состава капель распыла. В то же время далеко не всегда при реализации практических мероприятий по химической защите растений измерение размеров капель проводится с должной степенью точности, соответственно, технологический цикл, построенный на этих измерениях, не отвечает требуемому уровню энерго-, ресурсообеспечения и экологической безопасности. Иными словами, почти все существующие в мире технологии генерирования, измерения и применения промышленных аэрозолей остаются на уровне 60-х годов XX в.

В настоящее время отсутствует реальная возможность осуществления количественной диагностики и анализа результатов действия распылительного оборудования. Этот «научный вакуум» образовался еще в шестидесятые годы прошлого века, в самом начале процесса интенсивного внедрения мероприятий по химической защите растений в сельскохозяйственную практику. С годами разрыв между масштабом использования опрыскивающей техники и научным обоснованием этого процесса увеличился.

Такое отклонение от нормы было обусловлено, в первую очередь, тем, что методику определения количественных результатов дисперсных характеристик спектра распыла с учетом его быстрой деформации нельзя было считать надежной и использовать эти результаты в дальнейших расчетах по прагматизации процесса опрыскивания, повышения его эффективности, экологичности и др.

В работе [3], где проводится общий анализ проблемы, авторы пишут: «Качество распыления технологических жидкостей по современному американскому стандарту, как и в 60-е годы XX в., оценивается исключительно прилагательными, например, капля «очень мелкая, мелкая, средняя, крупная, очень крупная, чрезвычайно крупная». Объективность такой оценки качества распыла вызывает серьезные сомнения, и разработка на данной основе технологии мероприятий по химической защите растений не имеет реальных перспектив.

На основе анализа работ отечественных и зарубежных исследователей [4-9] можно сделать однозначный вывод о том, что оптимальный дисперсный состав капель распыла – главное условие оптимизации процесса опрыскивания в целом. Причем, речь идет об оптимальном дисперсном составе для каждого конкретного технологического цикла химзащитных работ.

К основным регламентирующим техническим и технологическим показателям техники для химической защиты растений относятся:

- норма расхода препарата;
- норма расхода рабочей жидкости (концентрация препарата в рабочей жидкости);
- плотность (численная концентрация) капель рабочей жидкости на поверхности объекта обработки;
- оптимальный дисперсный состав капель распыла (размеры капель, степень полидисперсности, производительность, возможность регулирования этих параметров).

Эти показатели являются основополагающими. Именно ими определяются оптимальные технические и технологические показатели распылительного механизма. Выше было сказано, что для определения этих показателей действует межгосударственный стандарт ГОСТ ИСО 5682-1-2004 «Оборудование для защиты растений. Оборудование распылительное. Часть 1. Методы испытаний распылительных насадок» (введен 01.01.2008). В нем пунктом 7.6. «Размер капель», подпунктом 7.6.1 «Принцип определения» устанавливается, что количество и размер капель определяют при перемещении насадки над расположенными в ряд одинаковыми чашками Петри, в каждую из которых попадает несколько капель из распыляемой струи. Выбирают такую насадку, у которой расход наибо-

лее близок к среднему значению. Все капли в каждой чашке Петри измеряют и распределяют по размерам. Общее количество собранных и распределенных по классам капель подсчитывают. Это испытание обеспечивает только минимальную точность, которая в данном случае означает, что в процессе распыления и осаждения капли частично испаряются (это основной фактор, влияющий на деформацию спектра распыла) их размеры уменьшаются, концентрация препарата в них соответственно возрастает и эти изменения никак не учитываются при определении размеров капель. Последствия этой неточности следующие: если линейные размеры капли изменились на 10%, то по массе эта ошибка составит уже 40%, а при 20%-ном изменении размеров ошибка в определении массы распыленной жидкости и, как следствие, ошибка норм расхода, концентрации препарата и других характеристик уже приблизится к 100%. Возможные количественные отклонения наблюдаемых характеристик качества распыла от истинных представлены на рис. 1.

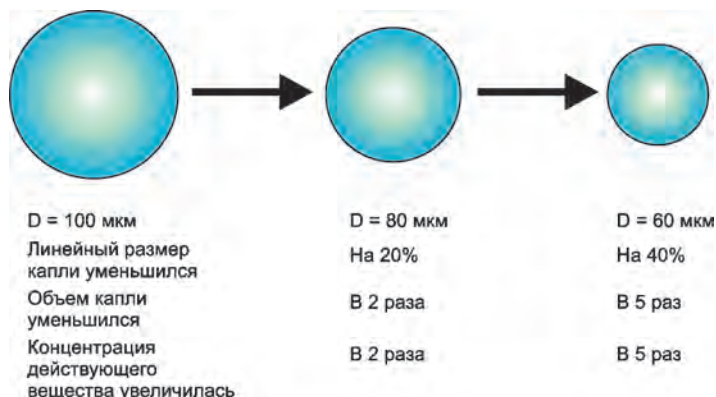


Рис. 1. Изменение физических характеристик капли в результате испарения

Экспериментальное исследование устройств тонкодисперсного распыления жидкостей и процессов формирования жидкокапельных сред связаны с рядом факторов, влияющих на точность получаемых результатов. При этом величина ошибки может быть очень значительной.

ГЛАВА II. ГЕОМЕТРИЯ ПОЛЯ ОРОШЕНИЯ

Фракционный состав капель распыла может претерпевать изменения внутри факела и после диспергирования. В основном это характерно для области, прилегающей к распылительному устройству, где велики концентрация капель и турбулентность потока.

Исследования показывают, что можно выделить три режима осаждения дисперсного потока – турбулентный, переходной и ламинарный (рис. 2).

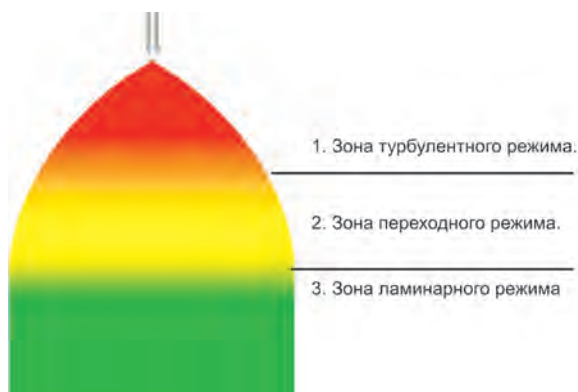


Рис. 2. Режимы осаждения дисперсного потока

Зона турбулентности – это зона трехмерного нестационарного движения, хаотических пульсаций параметров потока (величины и направления скорости, давления и т.д.).

Движение капель распыленной жидкости в вихревом потоке сопровождается изменением их размеров во времени и пространстве. При этом наибольший интерес представляет начальный участок движения капли в зоне наиболее активного воздействия потока.

В этом объеме факела, непосредственно прилегающем к соплу форсунки, наблюдается высокая концентрация капель. В абсолютном большинстве случаев эти капли полидисперсны. Их движение в турбулентном, вихревом, а следовательно, трехмерном потоке,

приводит к большому числу столкновений, в результате которых капли могут дробиться или сливаться (в зависимости от скорости и угла соударения). Таким образом, даже покидая распылитель, капли продолжают взаимодействие с внешней средой, в результате внутри этой зоны продолжается формирование спектра распыла, что приводит к увеличению степени полидисперсности.

Интенсивность этих процессов во многом зависит от концентрации капель в факеле. Попробуем рассчитать величину концентрации капель в прилегающей к форсунке зоне факела – зоне турбулентного режима.

При расходе жидкости 2 л/мин за время 0,05 с будет диспергировано 1,67 мл воды. В этом случае общее число образовавшихся капель со средним объемным диаметром 200 мкм составит $\sim 4 \times 10^5$ шт. В зависимости от скорости истечения струи (3, 4 и 5 м/с) за 0,05 с это количество капель заполнит зону факела высотой 0,15, 0,2 и 0,3 м соответственно. Конечно приведенные цифры недостаточны, но в первом приближении могут быть приняты для дальнейших расчетов.

Расчетные значения концентрации капель в зоне турбулентности при различных углах раскрытия факела приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения концентрации капель

Угол раскрытия факела	Концентрация капель шт/см ³		
	высота факела		
	0,15 м	0,20 м	0,25 м
50°	~520	~145	~112
70°	~230	~65	~50
90°	~110	~32	~24
110°	~55	~16	~12
130°	~25	~7	~5
150°	~8	~2	~2

Изменение концентрации капель в единице объема факела графически представлено на рис. 3.

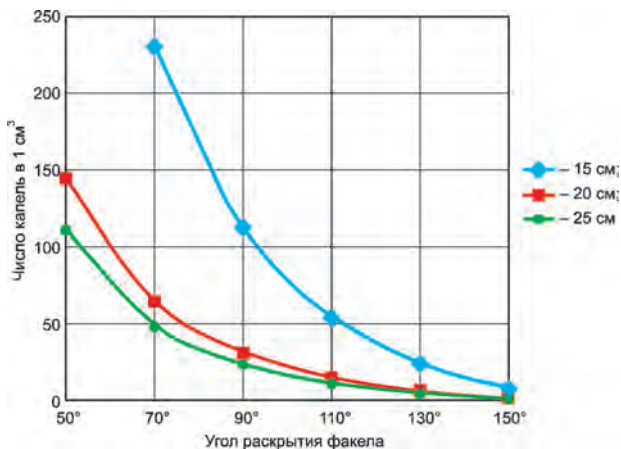


Рис. 3. Концентрация капель в факеле

Как следует из приведенных таблицы и графика, с увеличением угла раскрытия факела, концентрация капель уменьшается, снижается вероятность их взаимодействия, а следовательно, величина и скорость деформации спектра капель распыла. Детальное исследование гидродинамики факела и происходящих в нем физических процессов выходит за рамки настоящей работы.

Проводить измерения дисперсных характеристик спектра капель, как контактные, так и бесконтактные (оптические), в зоне турбулентности и переходной зоне было бы ошибочным, так как в этих зонах велика вероятность коагуляции капель. Реже может иметь место разбрызгивание капель при столкновениях на высоких скоростях.

Процессы, протекающие сразу после распада струи жидкости на выходе из форсунки, очевидно, можно считать завершающим этапом формирования спектра и окончательные параметры совокупности капель приобретает после выхода из зоны турбулентности.

Зона ламинарного режима – наименее возмущенная, поэтому отбор пробы аэрозоля следует производить именно в ней.

Само разделение на зоны достаточно условно так как невозможно четко обозначить границы каждой из них. На рис. 4 представлена фотография факела распыла капель гидравлической фор-

сунки. В отраженном свете ясно прослеживается наиболее яркая зона максимальной концентрации капель. Видна и переходная зона, в которой отдельные участки светятся по-разному. Область однородного свечения в отраженном свете – зона ламинарного режима. В ней горизонтальная составляющая скорости практически равна нулю и имеет место равномерное осаждение, скорость которого определяется формулой Стокса [1].

Геометрия факела распыла фактически определяет и геометрию поля орошения, а этот фактор, конечно, существенно влияет на точность результатов измерения. В первую очередь, это неоднородность счетной концентрации и дисперсных характеристик капель распыла на поле орошения, т.е. счетная концентрация и размер капель в пробах, взятых в одной плоскости, но на разных расстояниях от центральной оси факела, будут различаться. Это неотъемлемое свойство распылительного механизма и зависит от его конструкции. Таким образом, следует учитывать, что действие каждой отдельной форсунки, с точки зрения ее прикладного назначения характеризуется:

- геометрией факела распыла (габариты и форма факела);
- структурой факела распыла;
- степенью радиальной и окружной неравномерности плотности орошения и дисперсных характеристик капель распыла.

Только после анализа этих параметров можно переходить к определению дисперсных характеристик исследуемой форсунки.

В связи с этим возникает ряд вопросов:

- на каком участке поля орошения производить измерение дисперсных характеристик спектра распыла?
- на каком расстоянии от сопла форсунки производить отбор пробы капель распыла?
- по какому принципу производить сравнительные испытания распылительных механизмов?



*Рис. 4.
Фотография факела
гидравлической
форсунки*

- какие именно параметры форсунок являются основными, «паспортными» характеристиками распылителя?

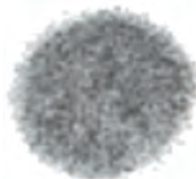
Очевидно, основные «паспортные» характеристики конкретной форсунки должны содержать следующие количественные показатели:

- размер и форму факела на различных уровнях потока;
- распределение интегральных характеристик факела на поле орошения;
- распределение дисперсных характеристик спектра капель распыла в плоскости сечения факела на уровне установившегося потока.

Геометрия поля орошения зависит от конструктивных особенностей форсунки. На рис. 5 представлены форма и заполнение орошаемой поверхности для различных типов форсунок [10].



Полный конус

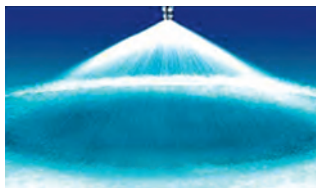


Полный конус спирального типа



Полый конус (тангенциальная конструкция)

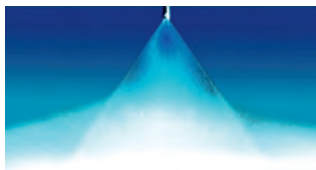




Полый конус (конструкция с дефлектором)



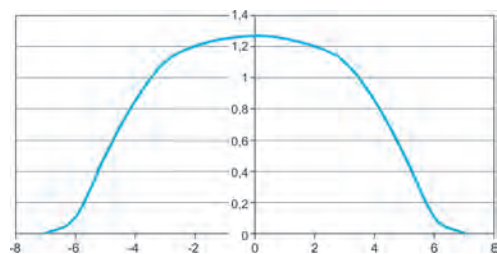
Плоская струя (прямоугольная форма)



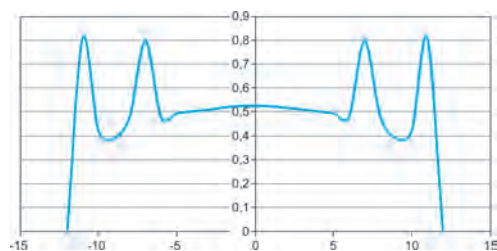
Плоская струя (овальная форма)

Рис. 5. Форма и заполнение орошаемой поверхности для различных типов форсунок

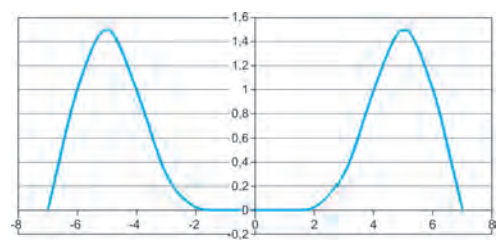
На приведенных изображениях представлены различные формы орошаемой поверхности. Существуют формы и другой геометрии. И во всех случаях внутри факела имеет место неоднородность численной концентрации и дисперсного состава капель относительно центральной оси факела. На рис. 6 представлены формы кривой распределения концентрации капель распыла в сечении факела. Представленные кривые носят качественный характер, но они могут дать представление о геометрии неоднородности в сечении факела.



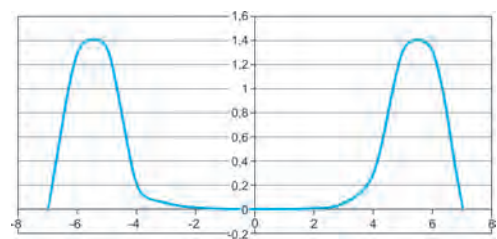
Полный конус



Полный конус спирального типа



Полый конус (конструкция с дефлектором)



Полый конус (тангенциальная конструкция)

Рис. 6. Формы кривой распределения концентрации капель распыла в сечении факела

С большой долей вероятности можно считать, что неоднородность внутри факела, симметрична относительно центральной оси факела, берущей начало в центре сопла форсунки.

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что участки поверхности орошения в сечении факела различаются по количеству капель, приходящихся на единицу площади, по средним размерам этих капель и, очевидно, суммарной массе капель на единицу площади поверхности сечения факела.

Таким образом, результат действия распылительной форсунки характеризуют два основных фактора – численная концентрация и размер капель, а также фактор второго порядка – масса осажденных капель. Все три фактора меняются независимо друг от друга (по крайней мере, в первом приближении) по высоте и, главное, по сечению факела.

На рис. 7 представлена графически объемная картина распределения численной концентрации капель распыла в сечении факела овальной формы (график носит качественный характер).

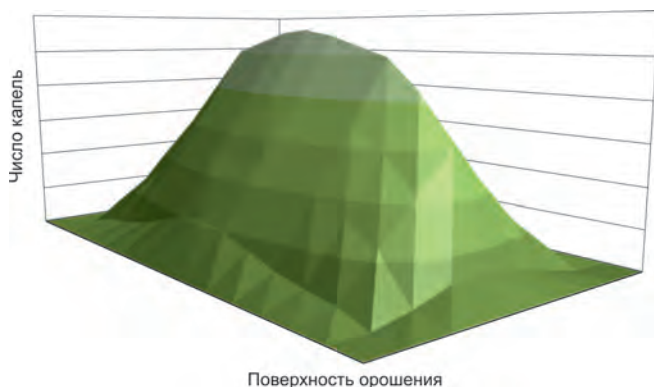


Рис. 7. График объемного распределения числа капель распыла в сечении факела

Численные показатели, отображающие дисперсные свойства спектра капель, носят многозначный характер. В таком случае, возникают вопросы: какой из показателей считать основным, и на каком именно участке поверхности орошения необходимо произ-

водить отбор пробы, чтобы полученные значения можно было считать единственно верными характеристиками, присущими данному типу распылительной форсунки. Однозначного ответа пока нет.

Очевидно, основной показатель, характеризующий действие форсунки, надо выбирать исходя из тех технологических режимов, на выполнение которых ориентирована форсунка.

Действие форсунок в процессе опрыскивания сельскохозяйственных объектов ядохимикатом – это непрерывное орошение поверхности растений в процессе линейного перемещения распылителя. В этом случае основными показателями можно считать численную концентрацию осажденных капель, равномерность покрытия и, конечно, среднюю массу рабочей жидкости, осевшей на единице поверхности растительного покрова.

Для определения этих показателей след, оставляемый форсункой (в данном случае овальной формы) на поверхности орошения, разбивается на полосы в направлении параллельном движению форсунки. Производится отбор пробы капель и внутри каждой полосы просчитывается суммарное количество капель. На основании полученных данных строится в относительных единицах график распределения концентрации капель распыла на линии орошения (рис. 8). По вертикали откладывается относительная масса жидкости (за единицу принята средняя по всему полю орошения масса жидкости), осевшая на единицу поверхности поля орошения, по горизонтали – расстояние от проекции сопла форсунки на поле орошения.

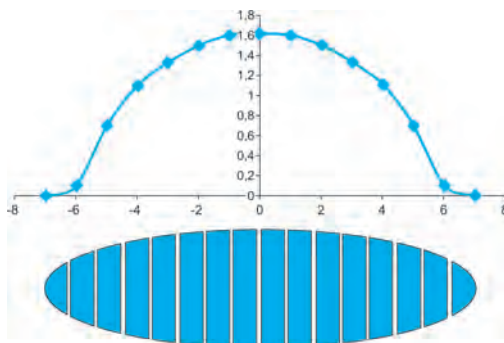


Рис. 8. Распределение капель по количеству (массе) на линии орошения

Зная количественное распределение концентрации капель по линиям на поле орошения можно достаточно точно определить расстояние между форсунками на штанге опрыскивателя, с тем, чтобы оптимизировать режим диспергирования по всей ширине захвата (рис. 9).

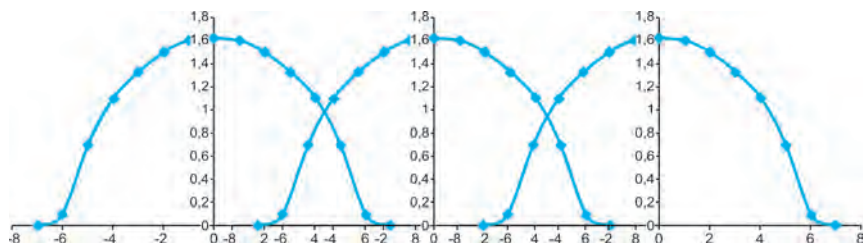


Рис. 9. Расчет расстояния между форсунками на штанге опрыскивателя

ГЛАВА III. ИСПАРЯЕМОСТЬ КАПЕЛЬ РАСПЫЛА

Одним из самых серьезных факторов, влияющих на точность количественной оценки показателей распыливающих устройств, является процесс испарения капель (в особенности мелких) и связанное с этим время их жизни.

В зависимости от температуры и влажности окружающей среды время полного испарения мелких капель (менее 30 мкм) колеблется от долей секунды до нескольких секунд, для сравнительно крупных капель (более 150 мкм) – до десятков секунд. Но в любом случае это не часы и даже не минуты. За время проведения эксперимента мелкие капли успевают полностью испариться, а крупные уменьшаются в размерах. Это в значительной степени искажает спектр капель распыла. На рис. 10 представлен график скорости испарения капель распыла.



Рис. 10. Динамика испарения в зависимости от температуры и влажности воздуха

Числовые значения времени испарения капель разных размеров в условиях различных температур и влажности внешней среды приведены в табл. 2.

Таблица 2

Время испарения капель

Диаметр капли, мкм	T = 20°C, влажность 80%	T = 25°C, влажность 60%	T = 30°C, влажность 50%
	время полного испарения капли		
25	2	1,1	0,6
50	7	3,7	2,1
75	16	9	4,7
100	50	30	14

Сопоставим теперь скорость испарения капель со скоростью их осаждения.

Графически скорость гравитационного осаждения представлена на графике (рис. 11).

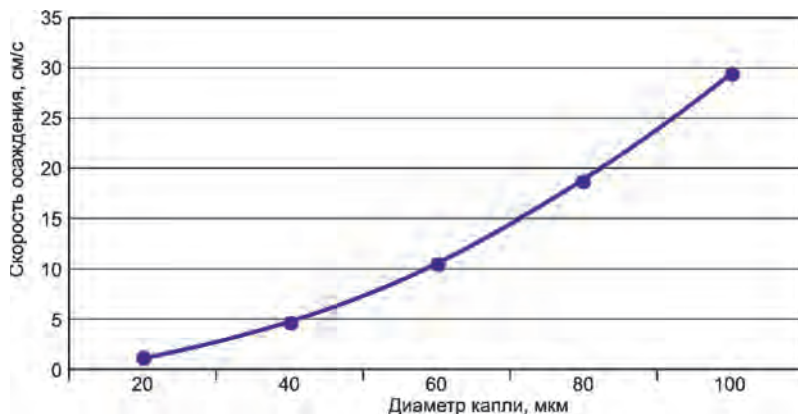


Рис. 11. Скорость гравитационного осаждения капель

Числовые значения скорости осаждения капель разных размеров (по Стоксу) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Скорость осаждения капель

Диаметр капли, мкм	Скорость седиментации, см/с	Время осаждения на 100 см, с
10	0,3	340
20	1,2	86
30	2,6	38
40	4,7	22
50	7,4	13,6
60	11	9,4
70	14	7
80	19	5,2
90	24	4,2
100	29	3,4

Как следует из табл. 3, капли размером менее 50 мкм практически не могут достичь поверхности защищаемого объекта, особенно если учесть, что в процессе осаждения они продолжают испаряться, их размер уменьшается, и соответственно, снижается скорость осаждения. Этот процесс также имеет место при осаждении капель на коллектор для дальнейшего измерения их размеров и значительно искажает результаты измерения.

Похожие результаты получены и в работе [11], где достаточно подробно рассматривается влияние размера капель на их физико-механические показатели (табл. 4).

Таблица 4

Зависимость механических характеристик капли от ее размера

	Диаметр капли						
	10	20	50	100	200	500	1000
Скорость седиментации, см/с	0,3	1,2	7,3	27	72	206	400
Снос капли (при скорости ветра 1 м/с и высоте падения 1 м), м	333	83,4	13,7	3,7	1,4	0,5	Н.д.

	Диаметр капли						
	10	20	50	100	200	500	1000
Время существования капли, с $t = 20^{\circ}\text{C}$, $W = 80\%$	Н.д.	Н.д.	12,5	50	200	Н.д.	Н.д.
$t = 30^{\circ}\text{C}$, $W = 50\%$			3,5	14	56		

Время существования водяной капли и дальность ее полета до полного испарения зависят от размера капли, температуры и относительной влажности воздуха.

Скорость испарения капель удваивается при каждом снижении относительной влажности воздуха (W) с 95 до 85%, с 85 до 70%, с 70 до 45%. Она также удваивается и при повышении температуры воздуха на 10°C в пределах от 10 до 30°C .

ГЛАВА IV. ГРАВИТАЦИОННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ КАПЕЛЬ ПО РАЗМЕРАМ

В лабораторных условиях процесс отбора пробы производится путем осаждения капель распыла на водоотталкивающую поверхность коллектора. За время экспозиции капли разных размеров с разной скоростью седиментации осаждаются на коллектор, и такая методика отбора пробы приводит к серьезным ошибкам.

Чтобы оценить степень ошибки рассмотрим следующий пример. В лабораторных условиях осуществляется диспергирование капель воды и производится отбор пробы на коллектор, покрытый гидрофобным слоем (предполагается, что проблема испаряемости решена). Длительность экспозиции коллектора не превышает 2-3 с. При большем времени экспозиции вероятность столкновения и слияния капель на поверхности коллектора резко возрастает, что может привести к деформации спектра осажденных на коллектор капель.

В течение всего времени экспозиции процесс диспергирования капель не прекращается, но с учетом разницы в скорости гравитационного осаждения крупные капли обгоняют мелкие и этот процесс приводит к гравитационному разделению капель по размерам. На рис. 12 представлен график скорости осаждения капель разных размеров.

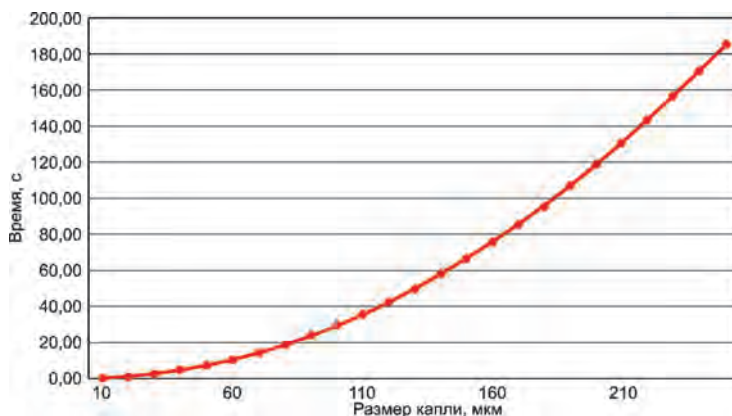


Рис. 12. Скорость гравитационного осаждения капель

Из приведенного графика следует, что при времени экспозиции 3 с на 1 см² коллектора осядут все капли:

- размером 50 мкм с высоты 0-22 см, т.е. из объема 22 см³;
- размером 100 мкм с высоты 0-88 см – из объема 88 см³;
- размером 150 мкм с высоты 0-200 см – из объема 200 см³;
- размером 200 мкм с высоты 0-350 см – из объема 300 см³.

При этом ни о какой репрезентативности выборки говорить не приходится. А без решения этого вопроса невозможно измерить истинное распределение капель по размерам в сечении факела распыла. На рис. 13 представлена гипотетическая рабочая версия, когда распылитель ежесекундно генерирует три капли размерами 100, 50 и 25 мкм. Капли осаждаются на коллектор с высоты 1 м. Через 5 с будет сгенерировано всего 25 капель, но поверхности коллектора достигнет только одна. Через 10 с в объеме присутствует 30 капель, но на поверхности всего 9, еще через 5 с – 16 капель на коллекторе из 45 сгенерированных. С каждой секундой эта разница будет увеличиваться и соответственно будет возрастать ошибка.

		0 с			5 с			10 с			15 с		
		100 75 50											
100 см					В воздухе			В воздухе			В воздухе		
					100 75 50			100 75 50			100 75 50		
					4 шт. 10 шт. 10 шт.			3 шт. 8 шт. 10 шт.			3 шт. 12 шт. 14 шт.		
					Осело			Осело			Осело		
		1 шт. 0 шт. 0 шт.			7 шт. 2 шт. 0 шт.			12 шт. 3 шт. 1 шт.					
		100			100 75			100 75 50					

Рис. 13. Пример отклонения количества осажденных капель от общего числа сгенерированных

Не следует забывать, что в процессе осаждения капли испаряются. На рис. 14 схематично представлена картина осаждения капель с одновременным испарением.

Начальный момент. Сгенерированы и начинают осаждение три капли размером 100, 75 и 50 мкм. Примерно через 3,5 с самая крупная капля достигнет поверхности, но при этом испарится до 95 мкм. Капли меньших размеров продолжают осаждаться, но их размеры уменьшились.

Средняя капля достигает поверхности примерно через 6,5 с, её размер уменьшился до 60 мкм. Также продолжают испаряться и две другие капли, размеры которых уменьшились до 90 мкм (крупная) и 35 мкм. По прошествии 14 с все три капли достигают поверхности коллектора, но их размеры значительно меньше первоначальных. Для мелких капель ошибка за счет испарения достигает 70% и более (рис. 14).

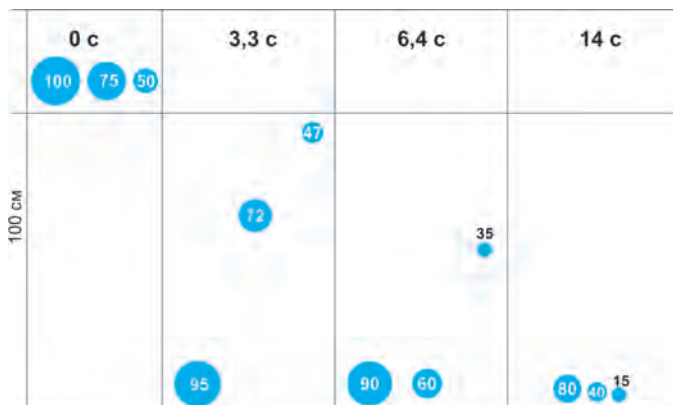


Рис. 14. Отклонения размеров осажденных капель от первоначальных в результате испарения

Ошибки, связанные со значительной разницей в скорости гравитационного осаждения капель разных размеров и их испаряемостью, характерны для существующих контактных методов отбора пробы.

Для исключения этих ошибок предлагается изменить существующую технику отбора пробы следующим образом:

- коллектор помещать в аэрозольную камеру до начала процесса распыления;

-
- время экспозиции определять не временем экспозиции коллектора, а временем поступления аэрозоля в аэрозольную камеру;
 - после перекрытия потока аэрозоля и отключения распылительного механизма выдерживать коллектор в камере до полного осаждения всех капель.

ГЛАВА V. МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ

Вопросу максимально точного определения размеров капель посвящен целый ряд экспериментальных исследований. Детальный анализ этих исследований выходит за рамки настоящей работы. В целом используемые методы анализа можно подразделить на прямые и косвенные методы измерения. Прямые методы измерения, как правило, контактные, предусматривают осаждение капель из дисперсного потока на гидрофобный коллектор или в иммерсионную жидкость с последующим измерением их размеров методом оптической микроскопии [12]. Однако именно при прямых методах [13] в наибольшей степени актуальна проблема «испаряемости» капель. Даже если после осаждения капли в иммерсионную жидкость размер капли стабилизируется, испарение в процессе осаждения окажет отрицательное влияние на искажение дисперсного состава. Особенно значительными эти искажения будут для мелких капель с низкой скоростью седиментации.

Интересная работа выполнена в институте проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН [14]. Изобретение относится к методам исследования жидкокапельных аэрозолей и предназначено для определения дисперсных характеристик распыла форсунок в широком диапазоне размеров частиц, в том числе нанометровом. Способ основан на распылении раствора неиспаряемой примеси в исследуемой жидкости с последующим дисперсным анализом частиц сухого остатка.

Более предпочтительны косвенные бесконтактные методы (оптические, лазерные) [15-19]. Во-первых, измерения проводятся в режиме реального времени и во взвешенном состоянии, т.е. размер и форма капель не искажаются. Оптические методы позволяют проводить большое количество измерений за небольшой временной отрезок и непосредственно в самом потоке.

Но дисперсные системы обладают спектральной и соответственно оптической неоднородностью. При проведении измерений вблизи распылительного устройства в условиях повышенной плотности

и турбулентности возникает проблема влияния на точность измерения нестационарности дисперсного потока. В условиях сформировавшегося факела выбор объема, в котором производятся измерения, затруднителен ввиду неоднородности дисперсного состава в горизонтальном сечении факела, связанного с гравитационным разделением капель разных размеров. Кроме того, не исключена коагуляция капель, к тому же их форма может отличаться от сферической. Для областей большего удаления от распылителя размер капель может измениться вследствие испарения.

Непрямые оптические методы имеют свои недостатки и при выборе аналитической функции, аппроксимирующей экспериментальное распределение капель по размерам.

Выбор аппроксимирующей функции сложная и неоднозначная задача. Как правило, исследователи отдают предпочтение одномодальным кривым с левосторонней асимметрией. Это может быть логарифмически нормальное распределение, гамма-распределение, распределение Пуассона и пр. Но насколько верным будет такой выбор. Если экспериментальная кривая имеет бимодальный вид, а это может иметь место, то результаты измерений с выбором одномодальной аппроксимирующей кривой будут весьма неточными.

Можно сказать, что сегодняшние методы оптической диагностики не отличаются высокой точностью. Означает ли это, что от лазерной диагностики спектра капель распыла следует отказаться? Это не так. Приведу простой пример – простая школьная линейка и штангенциркуль. Что точнее? Конечно штангенциркуль, но чего бы стоила вся его точность, если бы не существовало эталона метра. Так и в отношении оптических методов измерения спектра распыла. Нужен эталонный способ измерения размеров капель распыла, по которому можно произвести тестирование и градуировку лазерного прибора.

Наиболее точным методом определения размеров частиц аэрозолей, является метод прямого микроскопического измерения, особенно, когда речь идет об аэрозольных частицах правильной формы или каплях жидкости, осажденных на гидрофобную поверхность.

Как было сказано выше, основным фактором, приводящим к самой значительной деформации спектра капель, является испарение.

Кривая изменения диаметра капли размером 100 мкм за счет испарения при различных значениях влажности и температуры приведена на рис. 15.

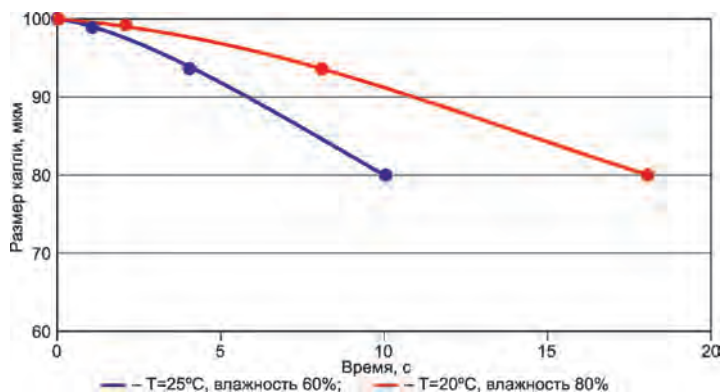


Рис. 15. Изменение диаметра капли за счет испарения

Кривая изменения массы капли в результате испарения, приведенная на рис. 16.

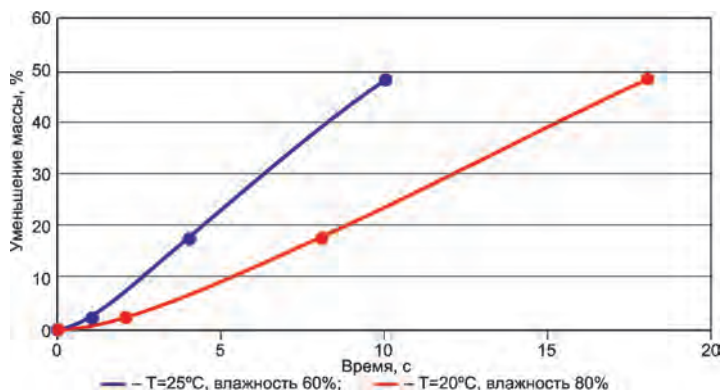


Рис. 16. Изменение массы капли за счет испарения

Как следует из приведенных графиков, за первые 10-20 с после образования капли диаметром 100 мкм может уменьшиться до 80 мкм, т.е. линейные размеры капли уменьшатся примерно на 20%. За это же время капля потеряет половину своего объема – массы. Следовательно, концентрация ядохимиката в ней увеличится вдвое, но эти изменения не будут учтены при расчетах количественных показателей работы опрыскивающей техники.

В конце 1980-х годов был разработан метод дисперсного анализа капель, возвращающий первоначальный вид спектра распыла, трансформированного в результате взаимодействия с внешней средой [20, 21, 22]. Суть метода в следующем. В каждую каплю в момент ее «рождения» помещается информационное ядро, несущее полную информацию о её первоначальных параметрах, которые могут быть восстановлены даже в случае полного испарения самой капли.

В качестве «информационного ядра» было выбрано гигроскопическое неорганическое соединение NaCl.

На рис. 17 представлена последовательность фотографий, на которых изображен процесс испарения капли раствора NaCl. Капля испарилась, но неиспаряемый сухой остаток сохранился, а зная первоначальную концентрацию соли в капле, можно рассчитать её размер. Следовательно в кристалле сохранилась полная информация о первоначальном размере капли.



а



б



б



г

*Рис. 17. Процесс испарения капли раствора NaCl:
а – начало процесса испарения капель; б – начало процесса выпадения в осадок кристалла NaCl в маленькой капле; в – процесс образования кристаллов NaCl в обеих каплях; г – полная кристаллизация капель*

Относительная влажность над насыщенным раствором хлористого натрия, а следовательно, и у поверхности сухого кристалла – 72-74%. Если относительная влажность в окружающей среде выше 74% на кристалле соли начнет конденсироваться влага, образуется капля раствора, и она будет расти до тех пор, пока значения влажности в окружающей среде и у поверхности капли не выровняются. При нулевом градиенте влажности размер капли стабилизируется. В табл. 5 приведены значения относительной влажности над растворами NaCl разной концентрации при различных температурах.

Таблица 5

**Давление водяного пара
в зависимости от концентрации раствора NaCl**

Концентрация раствора NaCl, %	Температура, °C		
	10	20	30
	относительная влажность над раствором, %		
10	89,5	89,6	90,1
15	86,3	86,3	86,4
20	81,1	81,1	81,2
25	74,7	74,8	74,8

Характерно, что для раствора хлористого натрия (при постоянной концентрации) относительная влажность над ним не меняется при изменении температуры в достаточно широком диапазоне. Это очень важно при проведении эксперимента, так как температура в аэрозольной камере может отличаться от температуры в лабораторном помещении.

Как было показано выше, если распылять не чистую воду, а раствор хлористого натрия (например, 10%-ной концентрации), относительная влажность над которым составляет 89%, то капли раствора, попав в среду с влажностью ниже этого значения, испарятся, но не исчезнут полностью. Останутся кристаллы NaCl. Если эти кристаллы поместить в закрытый сосуд, относительная влажность в котором равна 89%, то они начнут обводняться, и капли раствора будут увеличиваться до тех пор, пока влажность у их поверхности не достигнет 89%, т.е. пока концентрация соли в капле не станет равна 10%, что соответствует первоначальному размеру капли.

На рис. 18 схематично представлены этапы:

- образования капли 10%-ного раствора NaCl;
- испарения до состояния сухого кристалла;
- конденсации парообразной влаги на кристалле соли в камере;
- восстановления капли до первоначального размера.

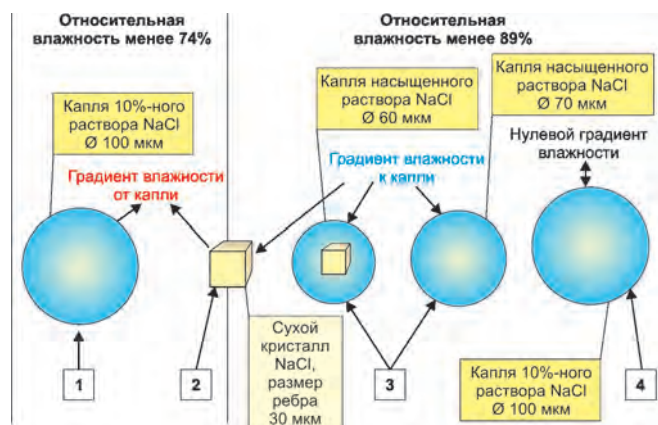


Рис. 18. Этапы эволюции капли раствора – образование, испарение, восстановление

Этапы отбора пробы (1, 2), восстановления и измерения первоначальных размеров капли (3, 4) могут быть разнесены во времени на сколь угодно длительный срок, т.е. отбор пробы можно провести в полевых условиях, а процесс восстановления и измерения осуществить через некоторое время в лаборатории.

ГЛАВА VI. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОССТАНОВЛЕННЫХ КАПЕЛЬ

Наиболее точным методом определения размеров частиц аэрозолей, является метод прямого микроскопического измерения, особенно, когда речь идет об аэрозольных частицах правильной формы или каплях жидкости, осажденных на гидрофобную поверхность.

Измерение размеров капель, которые на гидрофобной поверхности имеют форму шара, производится под микроскопом с максимальной точностью, в пределах цены деления объект-микрометра. Конечно, речь идет о размерах капель на момент измерения. Но если капля от момента образования до момента измерения претерпела какие-либо эволюционные изменения, учесть их при определении размеров капли не представляется возможным.

Экспериментальная установка поэтапной регистрации процесса восстановления капель схематически представлена на рис. 19.

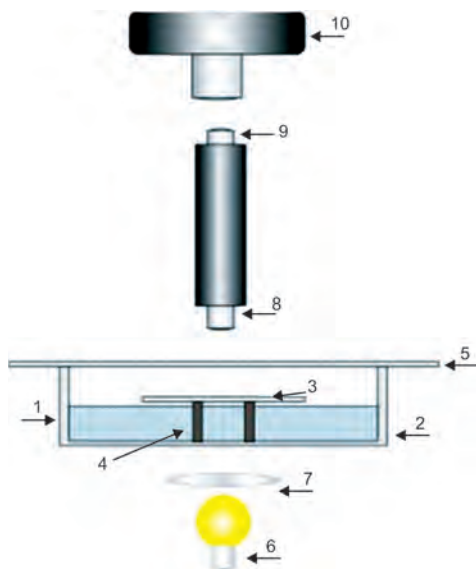


Рис. 19. Схема установки поэтапной регистрации процесса восстановления капель:
1 – гигростат;
2 – раствор (10%) NaCl;
3 – предметное стекло с гидрофобным покрытием;
4 – полая подставка под предметное стекло;
5 – стеклянная крышка;
6 – осветительная лампа;
7 – фокусирующая линза;
8 – объектив микроскопа;
9 – окуляр микроскопа;
10 – цифровая видеокамера

Качество экспериментальных исследований во многом зависит от правильного выбора лабораторного оборудования и инструмента. В данном конкретном случае основным лабораторным оборудованием являются оптический микроскоп и цифровая фото-, видеокамера.

Основные требования к микроскопу:

- тринокулярная поворотная насадка;
- диапазон увеличений: 40-2000 крат;
- предметный столик с координатным перемещением;
- коаксиальный механизм грубой и точной настройки;
- галогеновая подсветка с регулировкой яркости;
- совместимость с цифровыми камерами;
- наличие ахроматических объективов (ахроматические объективы имеют ахроматическую коррекцию. В них устранена кривизна поля для обеспечения максимально резкого изображения на всем диаметре. Объективы такой конструкции лучше всего подходят для макрофото съемки).

Таким требованиям удовлетворяет тринокулярный микроскоп Levenhuk 870T. Техническая характеристика которого приведена далее.

Техническая характеристика микроскопа Levenhuk 870T

Тип микроскопа	Световой/оптический, биологический
Тип насадки	Тринокулярная
Материал оптики	Оптическое стекло
Угол наклона окулярной насадки	30°
Увеличение, крат	40-2000
Диаметр окулярной трубки, мм	23,2
Окуляры	Парные PLAN WF10x, PLAN WF20x
Объективы	PLAN WF: 4x, 10x, 40x, 100x (масляный)
Револьверное устройство	На 4 объектива
Межзрачковое расстояние, мм	55-75
Предметный столик, мм	140×155
Диапазон перемещения предметного столика, мм	70×50

Диоптрийная коррекция окуляров, D	±5
Конденсор	Аббе N.A. 1,25
	Конденсор темного поля
Диафрагма	Ирисовая диафрагма премиум-класса
Фокусировка	Точная: 0,002 мм
	Грубая: 25 мм
Подсветка	Галогенная
Регулировка яркости	Есть
Источник питания	220 В/50 Гц
Назначение	Лабораторные/медицинские
Расположение подсветки	Нижняя
Метод исследования	Темное поле, светлое поле

Основные требования к цифровой камере приведены далее.

Техническая характеристика цифровой камеры

Максимальное разрешение	3584×2748
Число мегапикселей	10
Размер пикселя, мкм	1,67×1,67
Время выдержки, мс	Не более 1 мс
Возможность записи видео	Да
Кадровая частота, кадры в секунду	Не более 2 (min) и не менее 24 (max)
Формат изображения	*.jpg, *.bmp, *.png, *.tif
Формат видеороликов	Запись: *.wmv, *.avi, *.h264 (Win 8 или выше), *.h265 (Win 10 или выше)
Тип затвора	ERS (электронная моментальная фотография)

Таким требованиям удовлетворяет цифровая камера Levenhuk M1000 PLUS.

Техническая характеристика цифровой камеры Levenhuk M1000 PLUS приведена далее.

Техническая характеристика цифровой камеры Levenhuk M1000 PLUS

Максимальное разрешение	3584×2748
Число мегапикселей	10
Чувствительный элемент	1/2,3" CMOS
Размер пикселя, мкм	1,67×1,67
Чувствительность, Вольт/люкс-секунду на длине волны 550 нм	0,31
Время выдержки, мс	0,4-2000
Возможность записи видео	Есть
Кадровая частота, кадры в секунду @ при разрешении	1,9@3584×2748
	8@1792×1374
	27@896×684
Активный диапазон, дБ	65,2
Место установки	Окулярная трубка микроскопа Ø23,2 мм, вместо окуляра
Формат изображения	*.jpg, *.bmp, *.png, *.tif
Формат видеороликов	Запись: *.wmv, *.avi, *.h264 (Win 8 или выше), *.h265 (Win 10 или выше)
Спектральный диапазон, нм	380-650 (встроенный ИК-фильтр)
Тип затвора	ERS (электронная моментальная фотография)
Баланс белого	Авто/ручной
Контроль экспозиции	Авто/ручной
Программные возможности	Размер изображения, яркость, время выдержки
Выход	USB 2.0, 480 Мбит/с
Системные требования	Mac OS 10.12, Linux Ubuntu 14.04, Windows XP/Vista/7/8/10 (32 и 64 бит), процессор 2,8 ГГц Intel Core 2 или выше, не менее 2 Гб оперативной памяти, порт USB 2.0, CD-Rom
Программное обеспечение	Levenhuk
Корпус	Металлический
Питание	Через кабель USB 2.0
Диапазон рабочих температур, °C	-10...50

На рис. 20 представлена установка – микроскоп с цифровой фото-видеокамерой с выводом изображения на монитор ПК, на котором были проведены оценочные эксперименты. Их основная цель – экспериментальное подтверждение возможности восстановления первоначальных размеров капель.

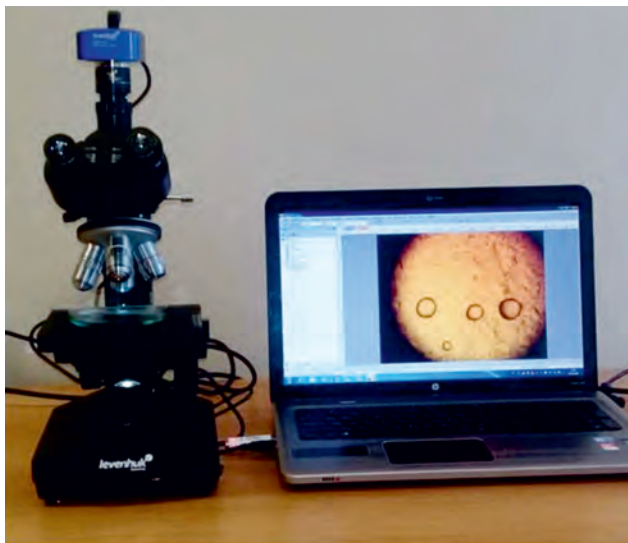
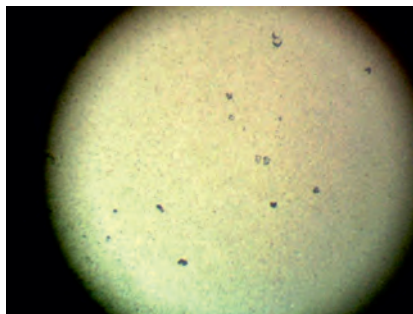


Рис. 20. Оптико-электронная установка регистрации процесса восстановления первоначальных размеров капель

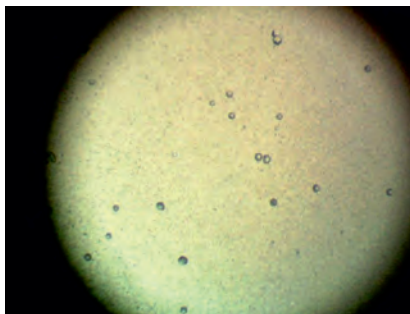
ГЛАВА VII. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ

Эксперименты проводились по следующей методике: распылялся 10%-ный раствор NaCl. Капли осаждались на предметное стекло, покрытое водоотталкивающим слоем (парафином), после чего стеклянная пластина помещалась в гигростат (чашку Петри), установленный на предметный столик микроскопа.

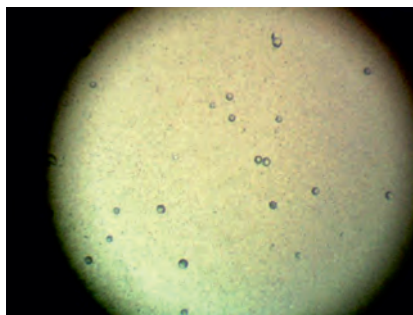
До включения процесса восстановления капель производилась цифровая фоторегистрация участка поверхности предметного стекла с осажденными на него каплями (рис. 21а).



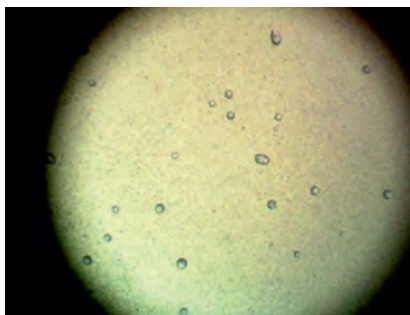
a



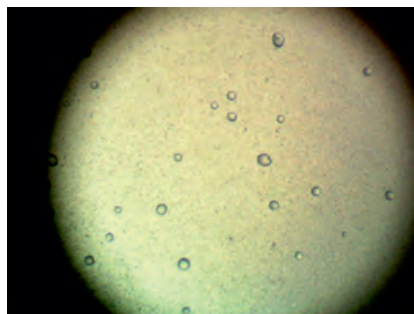
б



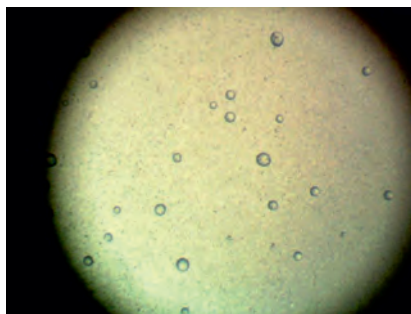
в



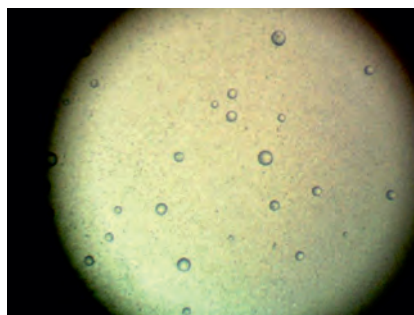
г



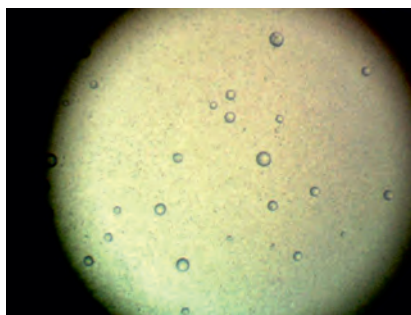
д



е



ж



з

Рис. 21. Фоторегистрация процесса восстановления капель: а – начало процесса (фаза сухих кристаллов); б – фаза обводнения (начало роста капель); в, г – фазы интенсивного роста капель; д, е – фазы замедления процесса конденсации; ж, з – фазы стабилизации размеров капель (временной интервал между снимками 5 мин – рост капель прекратился)

По времени фотография 21 а соответствует началу эксперимента, т.е. моменту помещения пробы капель на предметный столик микроскопа. К этому времени капли успевают частично испариться, учитывая, что процесс испарения продолжался в течение всего времени экспозиции, при переносе предметных стекол под микроскоп, в процессе фотографирования.

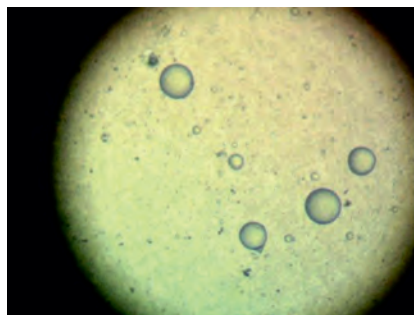
После запуска процесса восстановления капель начинается обратный процесс.

На фотографии (рис. 21 б) обводнение и рост мелких капель уже просматривается.

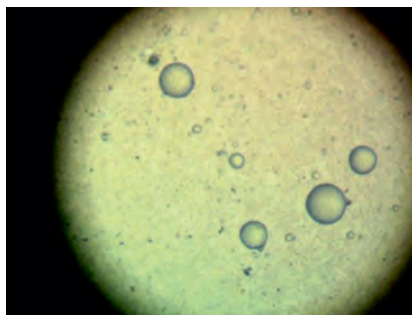
На фотографиях (рис. 21 в, г, д) наблюдается достаточно интенсивный рост капель, впоследствии он замедляется (рис. 21 е).

При сравнении фотографии (рис. 21 ж), сделанной через 5 мин с фотографией (рис. 21 з), сделанной через 8 мин, видно, что капли практически перестали расти. Можно считать, что конденсационный рост капель прекратился и они восстановили свои первоначальные размеры.

Процесс испарения протекает достаточно интенсивно. Даже в случае очень быстрого переноса предметного стекла с осажденными каплями на предметный столик микроскопа капли успеют частично испариться. На рис. 22 а представлена фотография капель через 10 с после образования, на рис. 22 б – те же капли, прошедшие процесс восстановления.



а



б

*Рис. 22. Сравнительные фотографии капель:
а – через 10 с после образования;
б – первоначальные размеры капель после восстановления*

На рис. 23 для сравнения представлены наложенные друг на друга графические изображения этих капель. Капли, не прошедшие процесс восстановления, окрашены в розовый цвет, восстановленные капли – зеленые.

Восстановленные капли (зеленый цвет) по размерам превышают невосстановленные (розовый цвет). Разница в линейных размерах составляет примерно 10%, а по массе – приближается к 30%.

Если в осажденной на коллектор пробе капли значительно отличаются друг от друга по размерам, это не повлияет на точность процесса восстановления. Процесс восстановления капель, значительно различающихся по размерам, представлен на рис. 24. В центре фотографии кристалл соли, выпавший в осадок при испарении крупной капли. Его окружают небольшие кристаллы, образовавшиеся в результате испарения мелких капель (рис. 24 а).

На рис. 24 б, в, г мелкие кристаллы превратились в капли и интенсивно растут, а крупный кристалл только начинает обводняться. На последующих снимках размеры мелких капель стабилизируются, они перестают расти, а процесс роста крупной капли продолжается достаточно интенсивно. На рис. 24 е, ж размер крупной капли увеличился, кристалл в ней полностью растворился, а размер мелких капель по сравнению с предыдущими photographиями не изменился.

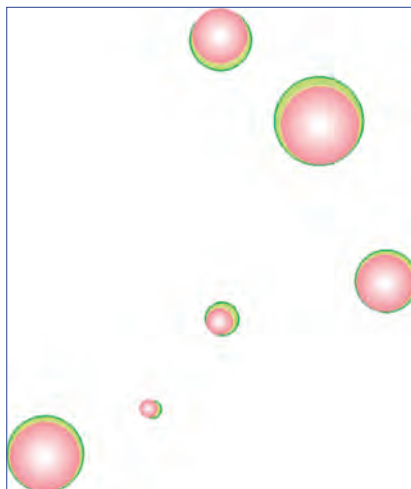
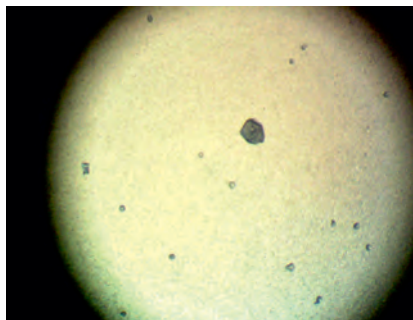
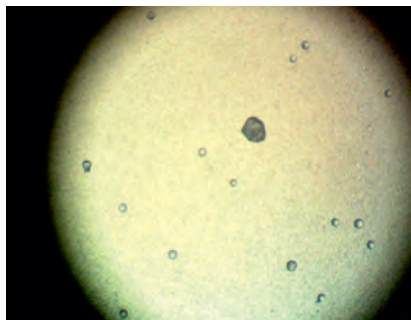


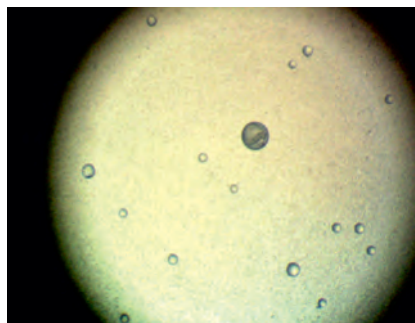
Рис. 23. Графические изображения капель



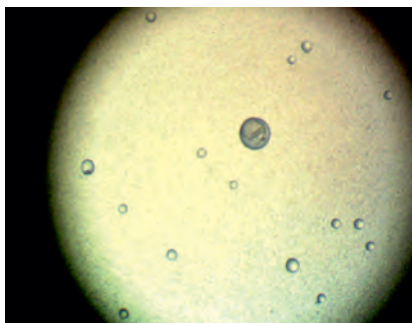
а



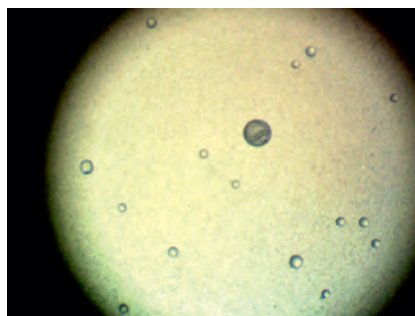
б



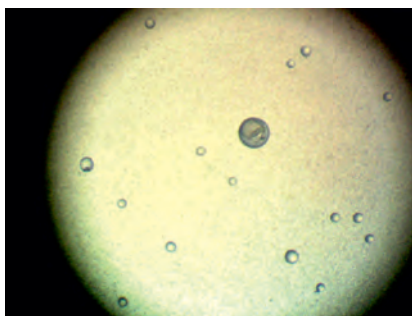
а



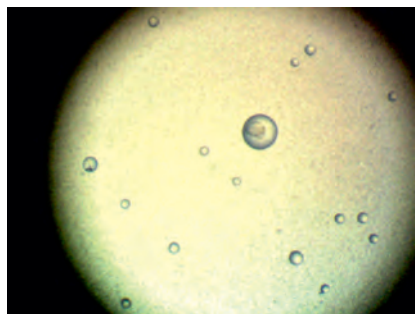
б



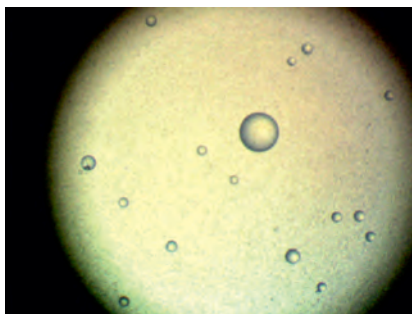
в



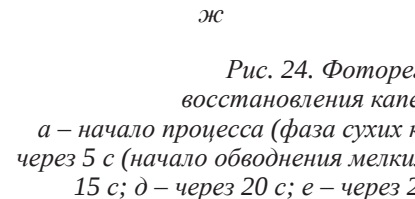
г



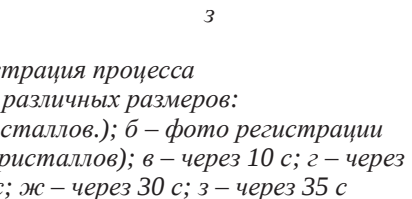
д



е



ж



з

*Рис. 24. Фоторегистрация процесса
восстановления капель различных размеров:
а – начало процесса (фаза сухих кристаллов.); б – фото регистрации
через 5 с (начало обводнения мелких кристаллов); в – через 10 с; г – через
15 с; д – через 20 с; е – через 25 с; ж – через 30 с; з – через 35 с*

Теоретический анализ и экспериментальная оценка процесса восстановления первоначальных параметров спектра распыла капель позволяет сделать вывод о перспективе дальнейшего развития технологии высокоточного измерения количественных характеристик качества химзащитных мероприятий.

Важным фактором соблюдения репрезентативности выборки (соответствие характеристик выборки характеристикам генеральной совокупности в целом) является условие случайного выбора участка микроскопирования на предметном стекле, т.е. необходимо производить микроперемещения предметного столика микроскопа со случайным выбором XY-координат новой позиции, не выходя при этом за пределы глубины резкости объектива.

Микроскоп, цифровая камера и камера восстановления являются основным лабораторным оборудованием при экспериментальном исследовании спектра распыла капель.

Каковы перспективы этого метода?

1. Разработка метода дисперсного анализа аэрозолей, возвращающего первоначальный вид спектру капель распыла, трансформированного в результате взаимодействия с внешней средой.

Распыленные капли в процессе осаждения частично испаряются. Спектр капель трансформируется, результаты измерения значительно искажаются. Предлагаемая методика (метод меченных капель) свободна от этих недостатков.

2. Создание программного обеспечения для количественной оценки качества распыла рабочих жидкостей.

В рамках этой программы возможно математическое моделирование оптимальных режимов распыла.

3. Разработка и создание стенда для натурных испытаний опрыскивателей.

На стенде в лабораторных и полевых условиях могут быть проведены измерения количественных характеристик качества распыла рабочей жидкости, подбор режима работы опрыскивателя, обеспечивающего оптимальные характеристики спектра диспергированных капель.

ГЛАВА VIII. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ АЭРОЗОЛЬНОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Отбор пробы капель распыла – не такой простой процесс, как может показаться на первый взгляд. Когда речь идет об оценке эффективности опрыскивания, густоте покрытия обрабатываемых площадей, дело обстоит проще. Карточки или предметные стекла с гидрофобным покрытием выкладываются вдоль траектории движения опрыскивателя. Время экспозиции выбирается таким, чтобы даже мелкие капли успели осесть на коллектор. Конечно, в полевых условиях невозможно предотвратить испарение и снос, но получаемая информация с достаточной достоверностью позволяет судить о качестве химзащитных работ. Однако если необходимо протестировать работу отдельного распылительного механизма, определить распределение капель по размерам, массе и густоте заполнения внутри факела на разных уровнях, то методику отбора пробы надо кардинально изменить. Во-первых, на коллектор необходимо осадить только те капли, которые образовались за период экспозиции. Не следует также забывать, что от момента включения распылительного устройства до выхода его на режим проходит некоторое время, в течение которого спектр капель распыла может резко отличаться от режимного. То же происходит при выключении распылителя. Таким образом, регулировать экспозицию простым включением и выключением распылителя не представляется возможным.

Для решения поставленной задачи – точного (эталонного) определения численных параметров спектра капель распыла – необходимо обеспечить такие условия эксперимента, чтобы при отборе пробы была обеспечена максимально возможная ситуация «невмешательства» в формирование и развитие дисперсных характеристик водного аэрозоля. Эти условия необходимо соблюсти даже с учетом применения способа восстановления первоначальных размеров капель.

В рамках научно-исследовательской работы «Разработка и изготовление лабораторного испытательного стенда для оценки качества распыливания рабочих жидкостей» разработана конструкция и осуществлена сборка аэрозольной камеры, в которой отбор пробы

аэрозоля производится в условиях равной вероятности осаждения для частиц всех размеров.

Это достигается тем, что время экспозиции определяется не длительностью выдерживания коллектора в потоке аэрозоля, а временем работы самой форсунки, а точнее временем, в течение которого поток аэрозоля подается в камеру. Время подачи регулируется заслонкой. При закрытой заслонке включается подача раствора на форсунку и после выхода ее на режим заслонка раскрывается, открывая аэрозолю доступ в камеру. В камере уже выставлены предметные стекла (коллекторы). Коллекторы после закрытия заслонки и отключения форсунок, выдерживаются в камере в течение времени, достаточного для осаждения самых мелких капель. После этого пробы переносятся в восстановительную камеру, затем обрабатываются под микроскопом. При этом определяется не только дисперсный состав факела, но и его «география», т.е. распределение капель по размерам и количеству на разных участках поля орошения.

Камера представляет собой куб размерами $2 \times 2 \times 2$ м. Внешний вид стенда (аэрозольной камеры) представлен на рис. 25.



Рис. 25. Испытательный стенд анализа дисперсных характеристик спектра капель распыла

Стенд изготовлен из алюминиевого профиля системы «Еврошоп». Сечение профиля и крепежные элементы представлены на рис. 26.

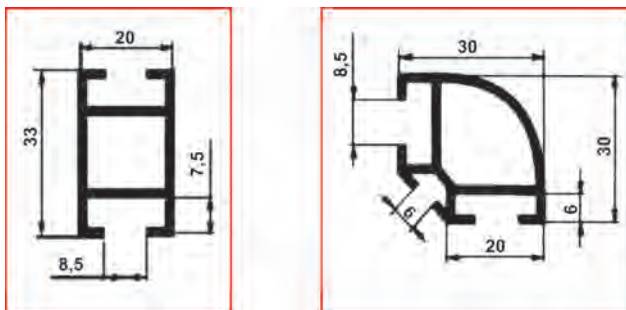


Рис. 26. Сечение профиля угловых и промежуточных стоек каркаса аэрозольной камеры

Назначение аэрозольной камеры – обеспечение репрезентативного отбора пробы аэрозоля, свободного от всякого рода ошибок, возникающих за счет:

- испарения капель;
- гравитационного разделения капель по размерам (скорости осаждения);
- инерционности распылительных механизмов;
- способа и времени экспозиции;
- вторичного разбрызгивания капель при ударе о стенки или потолок камеры.

Что касается испарения капель, то процесс восстановления первоначальных размеров полностью исключает искажение спектра распределения капель по размерам за счет испарения.

Гравитационное разделение капель по размерам – естественный процесс и изменить каким-либо образом физику этого процесса невозможно. Можно попытаться учесть разницу скорости осаждения капель разных размеров, вводя коэффициент, учитывающий это расхождение для капель каждого размера. Но при этом надо учесть изменение скорости осаждения за счет испарения капель, а в случае полного испарения вводить скорость осаждения частиц сухого остатка, влияние восходящих движений и т.д. Иначе говоря, процесс гравитационного осаждения многозначен и не может быть представлен, как функция одного аргумента. Решить эту задачу можно следующим образом. Коллектор вносится в камеру до на-

чала процесса распыления жидкости. Процесс распыления включается на некоторый промежуток времени (время экспозиции от 1 до 10 с). После прекращения распыления коллектор выдерживается в камере в течение времени, достаточного для осаждения всех образовавшихся капель. Затем коллектор может быть законсервирован до начала процесса восстановления и измерения размеров капель.

Кроме того, необходимо учитывать инерционность распылительных механизмов. От момента включения до выхода на рабочий режим проходит некоторое время, в течение которого спектр капель распыла существенно отличается от установившегося. То же, но в обратном порядке происходит при отключении распылителей. А так как время выхода на режим и время отключения распылителей соизмеримы с временем экспозиции, то спектр осажденных капель будет значительно искажен. Тогда необходимо включить распылитель до начала экспозиции. После выхода на режим осуществить доступ распыленных капель в камеру. По окончании экспозиции доступ в камеру следует перекрыть и только после этого отключить распылитель.

Для управления доступом капель в камеру предлагается использовать заслонку (отсекатель потока), которая представляет собой емкость специальной формы (рис. 27) и достаточных размеров и объема.

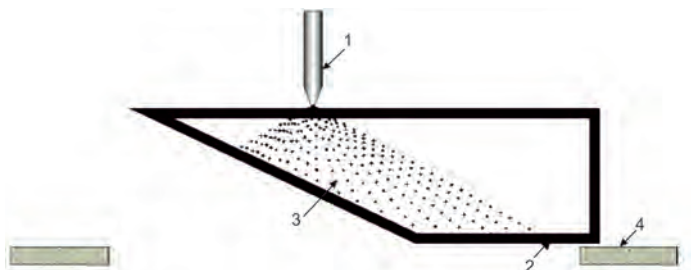


Рис. 27. Схематическое представление работы заслонки: 1 – форсунка; 2 – бок отсекающего потока; 3 – факел распыла; 4 – потолок камеры

Угол наклона передней стенки заслонки 130° предусмотрен с той целью, чтобы для форсунок с максимальным углом раскрытия факела 120° при движении отсекающего механизма исключался механический контакт капель в факеле со стенкой заслонки, т.е. не происходило

дробление капель при ударе о стенку. По этой же причине на потолке камеры, над заслонкой должно быть отверстие, иначе капли, отскакивая при соударении с внутренней поверхностью заслонки, будут попадать на поверхность потолка камеры и в дальнейшем стекать вниз, искажая спектр капель распыла.

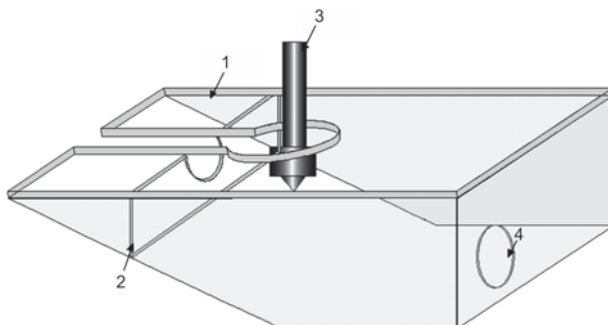
Форсунка установлена прямо над потолком в центре камеры. Под форсункой в потолке находится отверстие, размер которого чуть больше размера заслонки. Заслонка в нормальном положении перекрывает доступ аэрозоля в камеру. После включения форсунки и выхода ее на рабочий режим заслонка отводится назад, открывая доступ в камеру. По завершении экспозиции она возвращается в нормальное положение (закрыто). Материалом для изготовления заслонки служит акриловое стекло толщиной 4 мм.

Подготовленный для резки на фрезерном станке чертеж раскроя заслонки приведен на рис. 28. Вдоль черной линии производится фрезерная резка акрилового листа. Красным пунктиром обозначены линии фрезеровки, которая производится на глубину 3 мм фрезой, заточенной под 90° . По этой линии осуществляется термическая гибка акрила. Линии стыковки герметизируются специальным акриловым клеем. Для большей надежности все стыки покрываются силиконовым герметиком.



Рис. 28. Схема раскроя заслонки

Заслонка в сборе представлена на рис. 29.



*Рис. 29. Заслонка – отсекатель аэрозольного потока:
1 – крышка заслонки; 2 – защитная перегородка; 3 – форсунка;
4 – отверстие слива воды*

Процесс открытия и закрытия заслонкой доступа аэрозоля, должен осуществляться с высокой скоростью, чтобы время срабатывания заслонки было, как минимум на порядок меньше времени экспозиции. Эту задачу можно решить, используя в качестве движителя пневмоцилиндр.

В работе использовался пневмоцилиндр марки FESTO штоковый двухсторонний с поршнем $\varnothing 50$ мм, длиной хода 320 мм. Скорость выдвижения поршня не менее 1000 мм/с, демпфирование регулируемое (рис. 30).



Рис. 30. Пневмоцилиндр DSBC-80-320-PPVA-N3

Механическое соединение пневмоцилиндра с заслонкой осуществляется с помощью шарнира на шток (рис. 31 а) и опорной стойки (рис. 31 б).

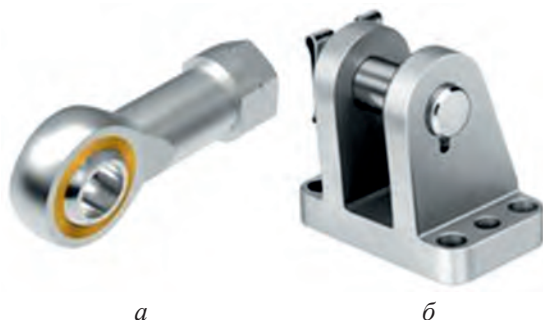


Рис. 31. Шарнир: а – на шток; б – опорная стойка

Шарнир навинчивается на шток пневмоцилиндра и фиксируется контргайкой в нужном положении. Опорная стойка крепится на заслонке и через втулку соединяется с шарниром. Шарнирное соединение не является жестким, что исключает опасность поломки заслонки при небольших качаниях в вертикальной плоскости.

Управление пневмоцилиндром осуществляется электромагнитным пневмораспределителем (рис. 32).



Рис. 32. Пневмораспределитель с электроуправлением F8-1C1

Распределитель управляет движением штока вперед-назад посредством реле времени или ручного переключателя. Скорость движения штока в прямом и обратном направлениях регулируется через клапаны, установленные во впускных отверстиях пневмоцилиндра. Воздух из компрессора подается на фильтр-регулятор давления MS6-LFR-1/2-D7-ERM-AS (рис. 33).



Рис. 33. Фильтр-регулятор давления MS6-LFR

Воздух из фильтра поступает на распределители и далее – на пневмоцилиндр. Фильтр-регулятор давления крепится на стенде посредством монтажной скобы (рис. 34).



Рис. 34. Монтажная скоба MS6-WB

Расстояние от заслонки до форсунки в режиме перекрытия не превышает 15 мм. При угле раскрытия факела 120° ширина факела в этой зоне не более 50 мм. При скорости движения штока 1 м/с время срабатывания заслонки составит около 0,05 с, что значительно меньше времени экспозиции.

Блок-схема управления работой заслонки, представлена на рис. 35.

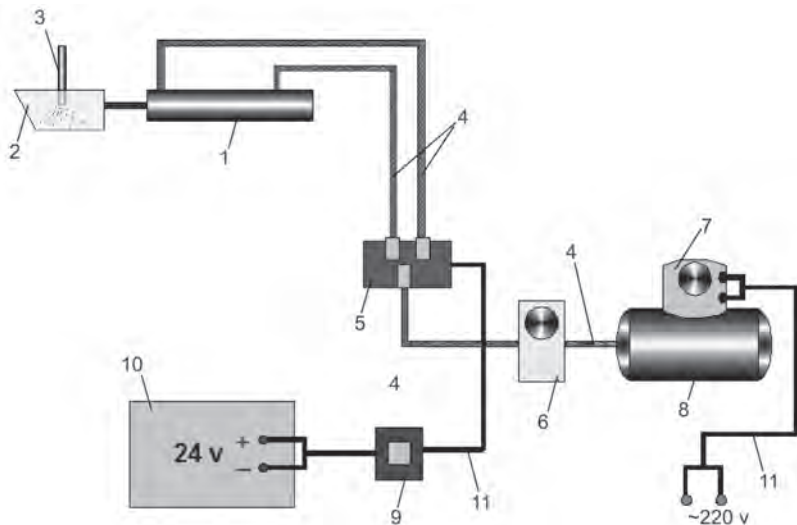
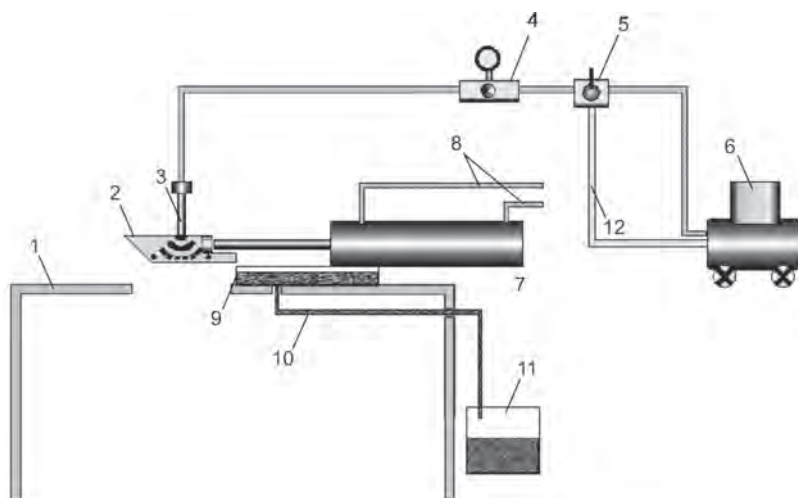


Рис. 35. Блок-схема управления работой пневмоцилиндра:
 1 – пневмоцилиндр; 2 – заслонка; 3 – форсунка;
 4 – воздухопровод; 5 – распределитель с электроуправлением;
 6 – фильтр-регулятор давления; 7 – компрессор; 8 – ресивер компрессора;
 9 – переключатель режима работы распределителя;
 10 – блок питания постоянного тока 24 В; 11 – кабель электропитания

Положение заслонки 2 по отношению к форсунке 3 – нормально закрытое. Форсунка начинает работать при закрытой заслонке. После выхода форсунки на режим, по команде, подаваемой в автоматическом (или ручном) режиме на переключатель режима работы 9 распределителя 5, срабатывает пневмоцилиндр. Заслонка отодвигается, открывая доступ потоку аэрозоля в камеру. Время экспозиции (поступление аэрозоля в камеру) выбирается оператором в зависимости от поставленной задачи.

Воздух на пневмоцилиндр поступает из ресивера 8 компрессора 7 по воздухопроводу 4 через фильтр-регулятор давления 6 и распределитель 5. Электроуправление распределителя питается от источника постоянного тока 10.

Блок-схема управления работой форсунки, представлена на рис. 36.



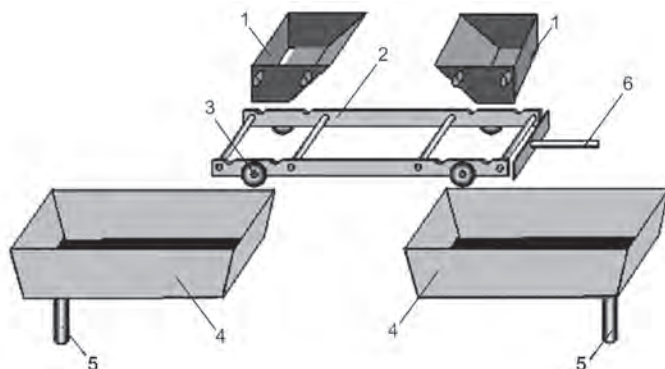
*Рис. 36. Блок-схема управления работой форсунки:
 1 – аэрозольная камера; 2 – заслонка; 3 – форсунка; 4 – манометр-регулятор; 5 – кран-переключатель; 6 – насос; 7 – пневмоцилиндр;
 8 – воздухопровод; 9 – кювета сливная; 10 – водопровод слива;
 11 – сливная ёмкость; 12 – возвратный водопровод*

Заслонка 2 с форсункой 3 и пневмоцилиндром 7 собраны на металлической раме и размещены на крыше аэрозольной камеры 1, там же установлена кювета 9 для слива жидкости из заслонки. Размер кюветы больше длины хода заслонки, поэтому при движении заслонки сливное отверстие постоянно находится над кюветой. По водопроводу 10 раствор из кюветы сливается в специальную ёмкость 11, установленную на внешней стороне стенки камеры.

Жидкость поступает на форсунку от водяного мембранного насоса 6 с рабочим давлением до 25-30 бар, регулируемым манометром-регулятором 4. Трехпозиционный кран 5 перекрывает поступление воды, направляет воду на форсунку и обратно в бак насоса.

Необходимым условием при проведении экспериментальных исследований является возможность регулирования времени экспозиции в широких пределах – от долей секунд до десятков секунд.

Блок-схема устройства регулирования времени экспозиции представлена на рис. 37.



*Рис. 37. Блок-схема устройства регулирования времени экспозиции:
1 – бокс; 2 – тележка; 3 – ролики тележки; 4 – сливные кюветы;
5 – трубка слива; 6 – толкатель тележки*

Принцип работы устройства: отсечные боксы 1 устанавливаются в углубления тележки 2. Тележка вместе с боксами может передвигаться на роликовых колесах 3 вдоль направляющих, установленных в верхней части каркаса камеры, перед пневмоцилиндром. Пневмоцилиндр через толкатель 6 управляет движением тележки. Перед началом экспозиции жидкость из распылителя поступает в левый бокс. После выхода на режим под действием пневмоцилиндра тележка движется поступательно и аэрозоль начинает поступать в аэрозольную камеру до того момента, пока второй, правый бокс не перекроет подачу аэрозоля в камеру. Длительное время экспозиции достигается тем, что выдвижение штока пневмоцилиндра совершается только до требуемой точки. В этом положении аэрозоль непрерывно поступает в камеру. После подачи следующего электрического импульса шток вдвигается обратно и доступ аэрозоля в камеру прекращается.

Такой большой диапазон времени экспозиции необходим для выполнения всего спектра работ по измерению дисперсных характеристик спектра капель распыла. При измерении геометрии факела распыла время измерения может достигать нескольких секунд или десятков секунд. Такой же порядок времени экспозиции при измерении распределения массы капель на поле орошения. А при

измерении дисперсных характеристик каплеь распыла время экспозиции не должно превышать нескольких секунд или долей секунд.

Под отсечными боксами на потолке камеры жестко закреплены правая и левая кюветы 4. Их размер и место крепления выбраны так, чтобы в любом положении бокса вода из него сливалась в кювету, из которой она через трубку слива 5 поступает в накопительный бачок.

Важным элементом устройства регулирования времени экспозиции является отсечной бокс (рис. 38), состоящий из трех основных деталей – корпуса, боковых стенок и перегородки.

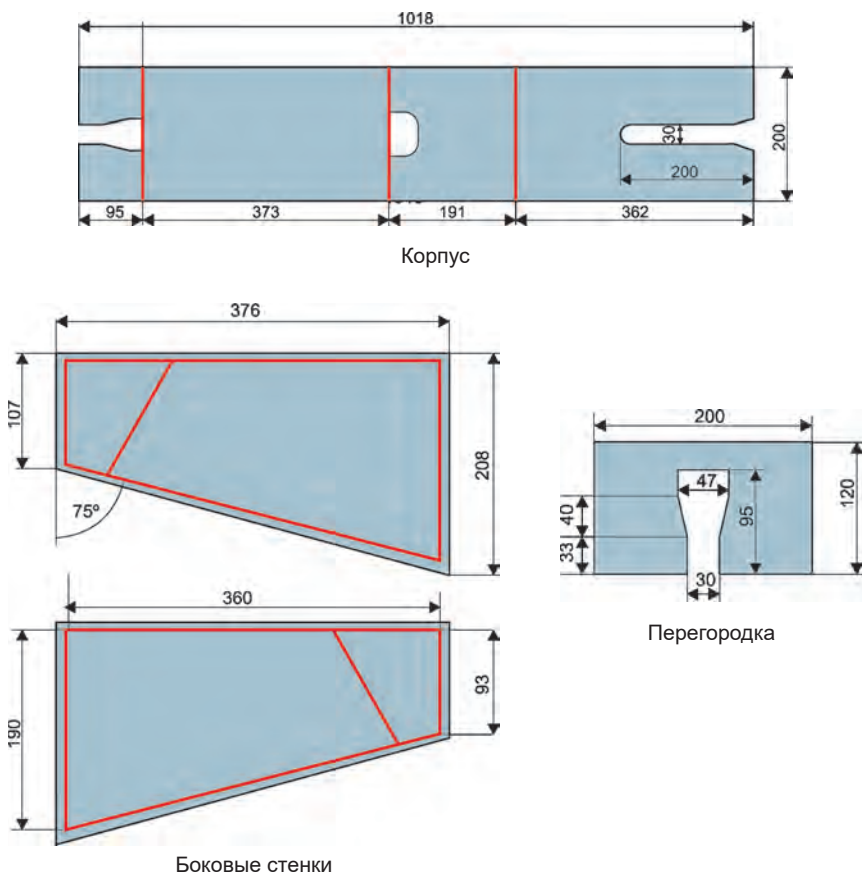


Рис. 38. Отсечной бокс

Корпус изготовлен на фрезерном станке из композита толщиной 4 мм. Красным обозначены выфрезерованные пазы, вдоль которых гнется деталь.

Назначение перегородки – исключить попадание в камеру капель, образующихся при закрытой заслонке в результате разбрызгивания струи внутри бокса.

Боковые стенки изготовлены из пластика толщиной 8-10 мм. Красным обозначены пазы. Ширина паза 4 мм, глубина – половина толщины стенки. В пазы вставляются корпус и перегородки (см. рис. 38). Соединения проклеиваются и герметизируются силиконом, который вводится непосредственно в пазы до вставки композита. Стенки после проклейки стягиваются сквозными болтами, которые одновременно служат элементами установки боксов на линейку.

ГЛАВА IX. ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Отбор пробы аэрозоля в камере планируется производить в условиях, исключающих возникновение ошибок. Как отмечалось ранее, это достигается тем, что время экспозиции определяется не длительностью выдержки коллектора в потоке аэрозоля, а временем работы самой форсунки, точнее временем, в течение которого поток аэрозоля подается в камеру.

При закрытой диафрагме включается подача раствора на форсунку, и после выхода ее на режим диафрагма раскрывается, открывая аэрозолю доступ в камеру, где уже выставлены предметные стекла (коллекторы). Коллекторы после закрытия диафрагмы и отключения форсунок, выдерживаются в камере в течение времени, достаточном для осаждения самых мелких капель. После этого пробы переносятся в восстановительную камеру, затем обрабатываются под микроскопом.

Для обеспечения чистоты эксперимента, при отборе пробы необходимо выполнить еще одно важное условие. Поверхность коллектора должна обладать высокими водоотталкивающими свойствами, т.е. быть гидрофобной. В противном случае капли будут растекаться по поверхности, менять форму и размер. Естественно, в этом случае измеренный размер капли не будет соответствовать действительному. Для капель размером менее 250 мкм парафиновая подложка будет обладать достаточной гидрофобностью, чтобы капли, осевшие на коллектор, сохранили шарообразную форму и свои размеры.

На рис. 39 схематично представлены примеры осаждения капель на поверхности с различными водоотталкивающими свойствами. На гидрофильной (смачиваемой) поверхности капли растекаются, не сохраняют сферическую форму, а следовательно, и свой размер.

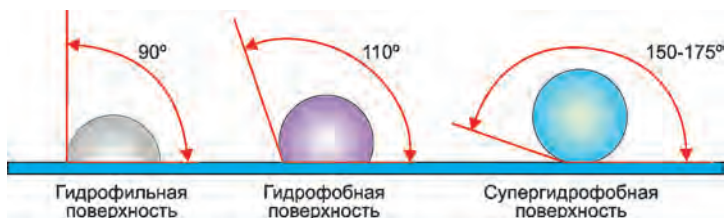


Рис. 39. Примеры осаждения капель на поверхности с различными водоотталкивающими свойствами

На поверхности со слабыми водоотталкивающими (гидрофобными) свойствами капли, хотя и незначительно, но все же растекаются, что приводит к искажению их размеров. На супергидрофобной поверхности (например, парафиновой) капли сохраняют сферическую форму.

Центральная ось факела распыла является его осью симметрии, относительно которой распределены неоднородности внутри факела.

На рис. 40 представлена картина геометрического места линий симметрии в сечении факела распыла.

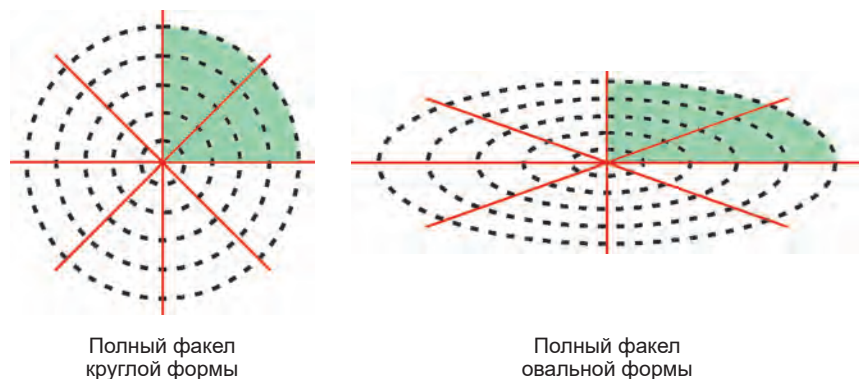


Рис. 40. Линии симметрии в сечении факела распыла

Нетрудно заметить, что секторы 0° - 90° , 90° - 180° , 180° - 270° и 270° - 360° в целом симметричны относительно оси и фактически повторяют друг друга. Таким образом, достаточно измерить распре-

деление спектра каплей распыла в одном из секторов и распространить результаты измерений на всю поверхность орошения. Исходя из вышесказанного в аэрозольной камере были определены линии размещения пробоотборников (рис. 41).



Рис. 41. Линии размещения пробоотборников

Поместив предметные стекла на все 16 площадок, получим выборку из генеральной совокупности, которая несет полную информацию о спектре каплей распыла. При необходимости, если градиент структуры неоднородности имеет высокую крутизну, количество предметных стекол можно увеличить.

Подготовка предметных стекол

Предметные стекла промываются, сушатся и складываются в закрытый пенал. Перед началом эксперимента на них наносится водоотталкивающий слой – парафин. На предварительно протертое спиртом стекло расплавленный парафин наносится подогретым стеклянным валиком, или тефлоновым шпателем, либо сдвоенные предметные стекла окунаются в расплавленный парафин. После чего стекла с нанесенным слоем выкладываются на поверхность, подогретую до 75-80°C, где выдерживаются 5-7 мин, чтобы поверхность парафина выровнялась и приобрела тонкую структуру.



*Рис. 42. Макрофотография
дробления капли при ударе
о гидрофильную поверхность*

рами 50-70 мкм (скорость седиментации для капель этих размеров 10-12 см/с), тормозя их осаждение. В основном это имеет место на периферии факела. Необходимо учесть, что капли жидкости при соударении с поверхностью могут разбрызгиваться (рис. 42).

Особенно это касается сравнительно крупных капель, размерами более 300 мкм. Капля дробится на множество мелких, которые могут быть вовлечены в объем факела и, тем самым, дополнительно исказить его структуру. На процесс дробления капель оказывает влияние не только размер самой капли, но и гидрофильность (или гидрофобность) поверхности, с которой капля соударяется.



*Рис. 43. Макрофотография
падения капли на гидрофобную
поверхность*

Во время отбора пробы капель предметные стекла не должны располагаться вблизи плоской поверхности большой площади. Поток аэрозоля увлекает за собой воздух, создавая слабые нисходящие воздушные движения. Отражаясь от плоской поверхности воздушный поток меняет направление. Конечно, скорость этих восходящих движений невелика, однако достаточна для вовлечения в потоки мелких капель разме-

При ударе о плоскость с гидрофильными свойствами поверхностная пленка капли разрушается, капля разрушается и разбрызгивается. При падении на гидрофобную несмачиваемую плоскость (рис. 43), поверхностная пленка не разрушается и выполняет роль эластичной оболочки.

Это явление имеет место и в практике химзащитных мероприятий при опрыскивании растительных объектов с развитым листовым покровом.

Для получения информации о геометрии факела распыла, измерения интегральных и дисперсных характеристик спектра капель распыла были изготовлены специальные инструменты.

Форму факела можно достаточно точно определить, пропуская узкий параллельный световой пучок (например, луч лазерной указки) сквозь поток аэрозоля, перпендикулярно направлению осаждения капель. Фотография, отображающая прохождение луча лазерной указки сквозь поток аэрозоля, представлена на рис. 44.

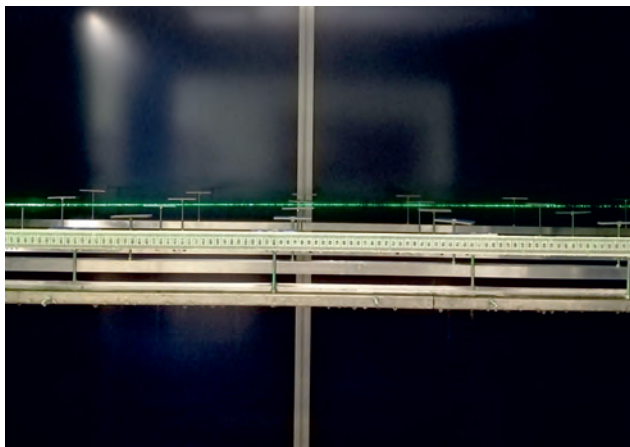


Рис. 44. Прохождения светового луча через поток аэрозоля

Для определения формы и измерения размеров факела распыла, нами разработан и изготовлен специальный инструмент – **световая линейка**. Эскиз линейки (вид спереди и сверху) представлен на рис. 45.

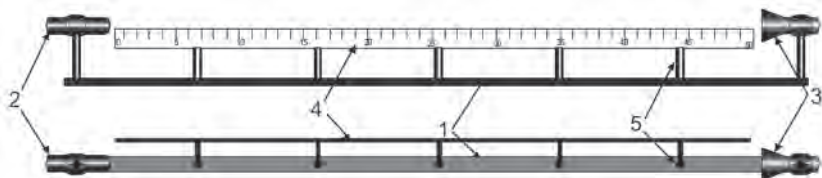


Рис. 45. Световая линейка: 1 – осветитель (лазерная указка); 2 – светоприемник; 3 – линейка; 4 – стойки крепежные; 5 – основание (труба алюминиевая прямоугольная 30×60×2000 мм)

В качестве осветителя 1 была выбрана зеленая лазерная указка (длина волны 532 нм), мощность луча которой составляла 50 мВт.



Рис. 46. Стойка крепления осветителя и светоприемника

Выбор мощности и длины волны был продиктован необходимостью высокой яркости свечения луча в аэрозольном потоке, что должно обеспечить высокую точность измерения геометрических размеров факела.

Светоприемник 2 представляет собой трубку, боковые стенки и дно которой оклеены черной матовой пленкой. Попад в эту ловушку, световой луч не отражается и затухает в ней.

Осветитель 1 (лазерная указка) и светоприемник 2 крепятся на стойке (рис. 46), которая устанавливается на основание линейки.

Линейка 3 изготовлена из композита толщиной 3 мм, на который наклеена пленка с нанесенными делениями. При этом нулевая точка линейки располагается в центре. Отсчет ведется в обе стороны от нулевой точки. (рис. 47).

В процессе эксперимента нулевая отметка линейки располагается на оси форсунки.



Рис. 47. Элемент измерительной линейки

Линейка, составленная из полос длиной 1 и 0,5 м, вставляется в пазы стоек крепления (рис. 48), установленных на основании так, чтобы стыковка полос осуществлялась в пазах стойки.

Основание 5 – универсальная базовая деталь, которая является опорой для сборки в режиме конструктора, инструментов для измерения основных характеристик факела распыла. Представляет собой алюминиевую трубу прямоугольного сечения размерами 30×60×2000 мм (рис. 49).

Длина основания 2 м. Предусмотрена возможность наращивания основания отрезками трубы длиной 0,5 м. Расстояние между отверстиями, через которые стойки крепятся к основанию, – 10 см (см. рис. 49, вид сверху). Диаметр отверстий 5 мм. Стойки линейки крепятся на расстоянии 1 м друг от друга. Основание линейки помещается на горизонтальные направляющие, установленные на стенки аэрозольной камеры. Направляющие устанавливаются на противоположных стенках на расстоянии 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м от форсунки.

В процессе эксперимента световая линейка, помещенная на один из горизонтальных уровней, перемещается параллельно первоначальному положению на заданное расстояние. Определяются численные значения конечных позиций светящегося участка луча относительно нулевой отметки. Схема эксперимента по определению размеров и формы факела распыла приведена на рис. 50.



Рис. 48. Стойки крепления линейки

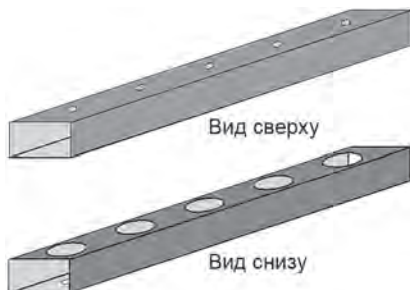


Рис. 49. Основание линейки

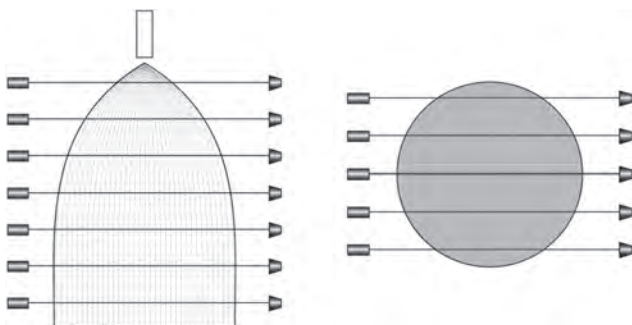


Рис. 50. Сканирование факела распыла

Сканируются сечения факела на разной высоте, определяются размеры хорд в каждом сечении. Проводится не менее 5-6 измерений в каждом сечении. Для факелов сложной, несимметричной формы (прямоугольной, овальной, кольцевой и др.) число измерений в каждом сечении возрастает. Аналогично число сечений, в которых проводится сканирование, в зависимости от формы факела может меняться в пределах 5-10 уровней. Число измеренных хорд остается одинаковым в каждом сечении.

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 51. Световая линейка устанавливается поочередно на уровнях $Ay \div Fy$. На каждом уровне измерения проводятся в позициях от Ax до Fx .

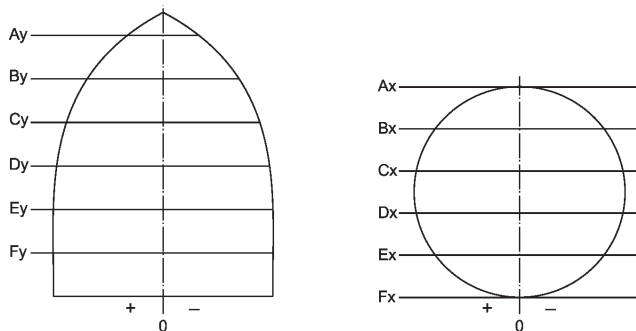


Рис. 51. Схема эксперимента по определению формы факела

Значения конечных координат относительно нулевого значения точек хорд вносятся в табл. 6.

Таблица 6

Y	X	+	-	Y	X	+	-
A	A			D	A		
	B				B		
	C				C		
	D				D		
	E				E		
	F				F		
B	A			E	A		
	B				B		
	C				C		
	D				D		
	E				E		
	F				F		
C	A			F	A		
	B				B		
	C				C		
	D				D		
	E				E		
	F				F		

Табл. 6 фактически является базой данных. Накопленные в ней результаты измерений автоматически переносятся в табл. 7, 8, где группируются по принадлежности к соответствующему горизонтальному или вертикальному сечению. По результатам строятся графические изображения контуров факела в сечениях.

В верхней части факела, где диаметр горизонтального сечения невелик, а в вертикальном сечении кривизна поверхности наиболее заметна, количество сканируемых сечений и число измеряемых в них хорд может быть увеличено по сравнению с нижней частью факела.

Таблица 7

Хорды горизонтального сечения

X	Y											
	A		B		C		D		E		F	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
A												
B												
C												
D												
E												
F												

Таблица 8

Хорды вертикального сечения

X	Y											
	A		B		C		D		E		F	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
A												
B												
C												
D												
E												
F												

Важным параметром, характеризующим работу распылительного механизма, является величина неравномерности распределения массы рабочей жидкости, осажденной на поле орошения. Для измерения этого параметра нами используется специальный инструмент – пробоотборник (рис. 52).

*Рис. 52. Пробоотборник*

Центральной деталью пробоотборника является универсальное основание, то же что и для световой линейки.

На нижней стороне основания, напротив отверстий для крепления стоек выфрезерованы отверстия диаметром 40 мм, в которые вставлены емкости для сбора жидкости (могут использоваться пробирки с мерной шкалой). Измеренное значение массы жидкости вносится в ячейку таблицы, соответствующую номеру контейнера. На основании этой таблицы строится график распределения массы жидкости на участке поля орошения.

Как отмечалось ранее, основные показатели спектра капель – концентрация и размеры – неоднородны и их численные показатели зависят от местоположения на поле орошения.

Для измерения количественных значений дисперсных характеристик капель распыла, изготовлен прибор – измеритель спектра, собранный на базе универсального основания (рис. 53). В отверстиях верхней плоскости основания крепятся стойки, на которых будут размещены предметные стекла. Расстояние между стойками (предметными стеклами) выбирается в зависимости от степени неоднородности спектра капель в конкретном сечении.

Стекла покрыты гидрофобным слоем и капли, осаждаясь на эту поверхность, сохраняют сферическую форму. Отбор пробы, как и в случае измерения геометрии факела и интегральных характеристик распыла, производится на разных хордах сечения и разных уровнях.

После экспонирования и выдержки в аэрозольной камере предметные стекла помещаются в контейнеры, защищенные от пыли и механического воздействия. Перед непосредственным измерением количества капель и их размеров предметные стекла помещаются в восстановительную камеру (рис. 54).

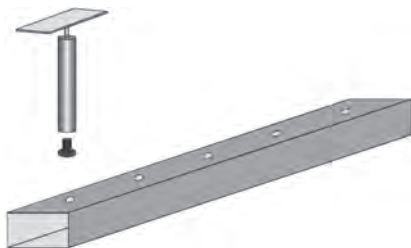


Рис. 53. Измеритель неоднородности дисперсных характеристик в сечении факела

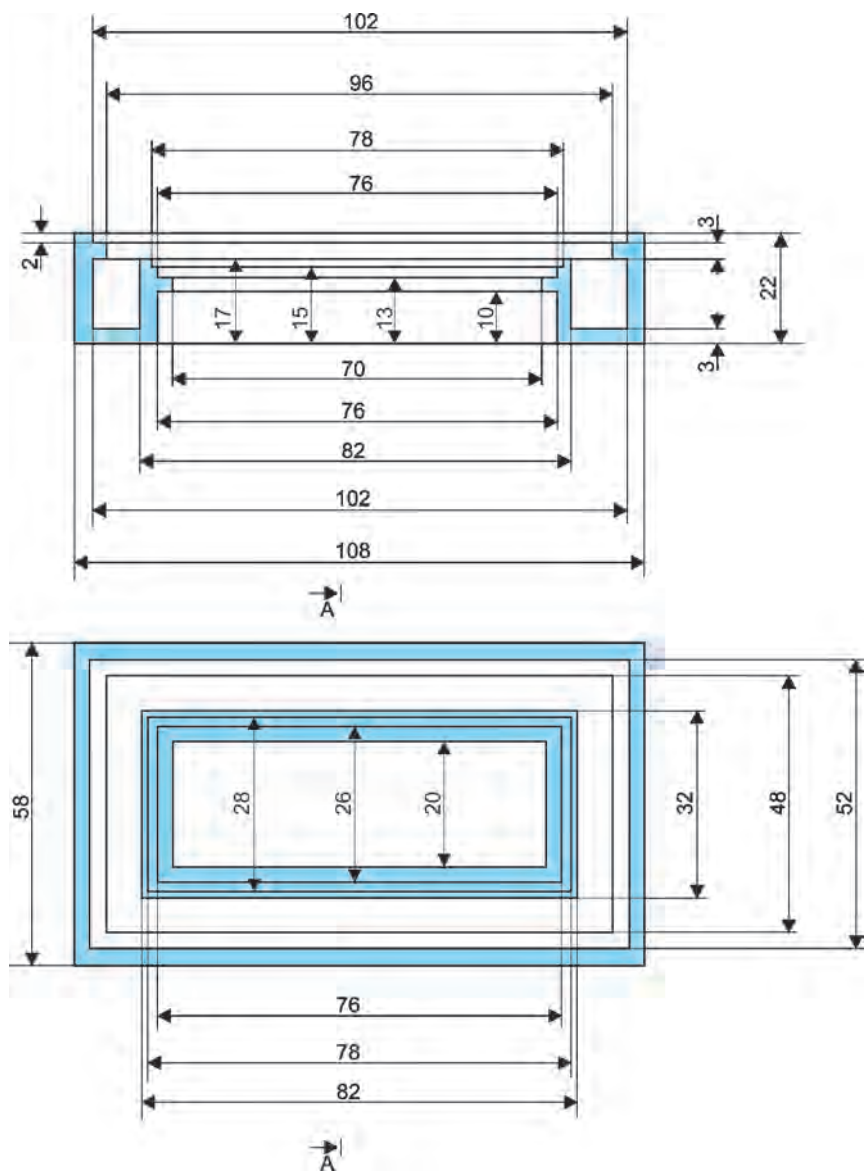


Рис. 54. Эскиз камеры восстановления

Камера восстановления фактически является гигростатом, уровень влажности в котором соответствует влажности над распыляемым раствором. Кристалл соли, или частично испарившаяся капля раствора, попав в гигростат, начинают конденсировать влагу до тех пор, пока концентрация соли не станет равна начальному значению концентрации в момент распыления. А это означает, что капля восстановлена до своих первоначальных размеров.

Камера – это полый бокс с внешними размерами 108×58 мм, высотой 22 мм. Эти параметры соответствуют размерам предметного столика микроскопа, на который помещается камера. В центре камеры прямоугольное отверстие с высокими стенками (см. рис. 54). Ширина стенки позволяет вклеить на площадку пластинку из матового стекла, которая препятствует проникновению в камеру воздуха извне. Внутри отверстия помещен светодиодный осветитель. На матовое стекло помещается предметное стекло с пробой аэрозоля, внутрь заливается раствор, аналогичный распыляемому, бокс накрывается стеклянной крышкой и помещается под микроскоп.

В эксперименте задействовано до восьми восстановительных камер, чтобы минимизировать время перехода к очередному предметному стеклу. Иначе говоря, процесс восстановления одновременно проходят восемь предметных стекол. Далее в каждой освоенной восстановительной камере будет произведена смена предметного стекла. Таким образом, эксперименты по определению количественных характеристик спектра могут проводиться в непрерывном режиме.

Процесс измерения размеров капель и расчета основных характеристик спектра (счетная концентрация, средние размеры, дисперсия и др.) производится с использованием компьютера по методике, разработанной в [23].

ГЛАВА X. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Представляется важным подобрать экспериментально обоснованный вид аналитической функции, аппроксимирующей экспериментальную кривую. В противном случае все дальнейшие расчеты технологически эффективных режимов работы распылительной техники, будут выполнены с большой погрешностью. Аналитическое выражение функции распределения по размерам капель распыла лежит и в основе не прямых методов измерения (оптические, лазерные и др.). Без максимально приближенной к экспериментальным значениям аналитической кривой (а возможно, и суперпозиции нескольких кривых) результат не прямых измерений будет ошибочным.

При этом все параметры распределения, полученные из эксперимента, должны в пределах ошибки совпадать с расчетными.

Методика обработки экспериментальных данных следующая:

- результаты измерения размеров капель группируются по значениям и заносятся в таблицу;
- вычисляется счетная концентрация капель;
- средний линейный диаметр капель;
- средний объемный диаметр капель;
- среднее квадратичное отклонение;
- суммарный объем капель, осажденных на единицу площади (расход);
- строится кривая распределения капель по размерам.

По виду кривой выбирается (если это возможно) аналитическое выражение, которым можно аппроксимировать экспериментальную кривую. Многие исследователи выбирают гамма-распределение или логарифмически нормальное распределение. Именно логарифмически нормальное распределение было рекомендовано академиком Колмогоровым для описания спектров размеров дробленых материалов.

В дальнейшем это аналитическое выражение становится основой методов не прямых способов измерения дисперсных характеристик аэрозолей (например, в оптических и лазерных измерителях дисперсного состава капель).

Но всегда ли возможен такой подход?

В качестве примера рассмотрим экспериментальные данные, полученные Н.В. Никитиным (22) в опытах с дисковым распылителем.

В табл. 9 приведены данные, полученные в процессе эксперимента, а также вычисленные на основе этих данных параметры распределения.

Из данных табл. 9 следует, что приведенная кривая характеризуется умеренной левосторонней асимметрией, сравнительно небольшим среднеквадратическим отклонением и высокой густотой покрытия, что неудивительно для капель таких размеров.

Интересно другое. Кривая имеет не один, а три пика (моды). Надо ли считать это ошибкой эксперимента или статистической погрешностью? Сама физика процесса дробления жидкости дисковыми распылительными механизмами говорит о высокой вероятности построения экспериментального графика спектра размеров в виде бимодальной или даже трехмодовой кривой.

Таблица 9

Среднее значение диаметра капли в интервале		Концентрация капель в интервале, шт/см ²	Средний объем капли в интервале, мкм ³	Суммарный объем капель в интервале, мкм ³
линейное	объемное			
10	12,1		917	-
20	21,2	2,4	4 978	11 947
30	30,8	3,7	15 327	56 710
40	40,6	3,9	35 108	136 921
50	50,5	13,2	67 465	890 538
60	60,4	103,1	115 542	11 912 380
70	70,4	181,9	182 483	33 193 658
80	80,3	98,5	271 432	26 736 052
90	90,3	122,2	385 533	47 112 133
100	100,2	60,1	527 930	31 728 593
110	110,2	40,4	701 767	28 351 387
120	120,2	18,4	910 188	16 747 459
135	135,7	18,5	1 310 459	24 243 482
155	155,6	21,6	1 975 677	42 674 612
175	175,6	61,8	2 835 823	175 253 831

Среднее значение диаметра капли в интервале		Концентрация капель в интервале, шт/см ²	Средний объем капли в интервале, мкм ³	Суммарный объем капель в интервале, мкм ³
линейное	объемное			
195	195,5	6,5	3 916 048	25 454 315
215	215,5	3	5 241 506	15 724 520
235	235,4	0,9	6 837 349	6 153 614
250	250,1	2,8	8 197 325	22 952 510
260	260,1	0,3	9 220 042	2 766 013

На основе данных, приведенных в табл. 9, вычислим основные характеристики распределения (табл. 10) и построим кривую распределения по размерам капель распыла (рис. 55).

Таблица 10

Основные параметры распределения капель по размерам

Средний диаметр (линейный), мкм	Средний кубический диаметр (объемный), мкм	Среднее квадратичное отклонение	Суммарный объем капель, дм ³ /га	Концентрация капель, шт/см ²
93	108	37	51	763,2

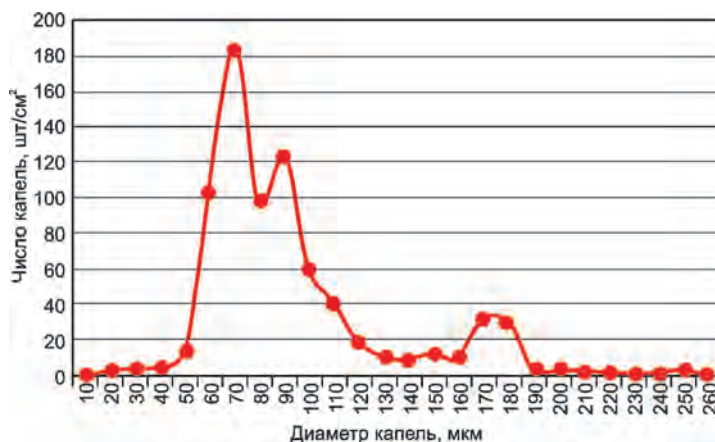


Рис. 55. Распределение капель по размерам

На графике распределения капель по размерам четко прослеживаются три пика.

Еще более ярко многомодовость отображена на графике распределения капель по их объемам (рис. 56).

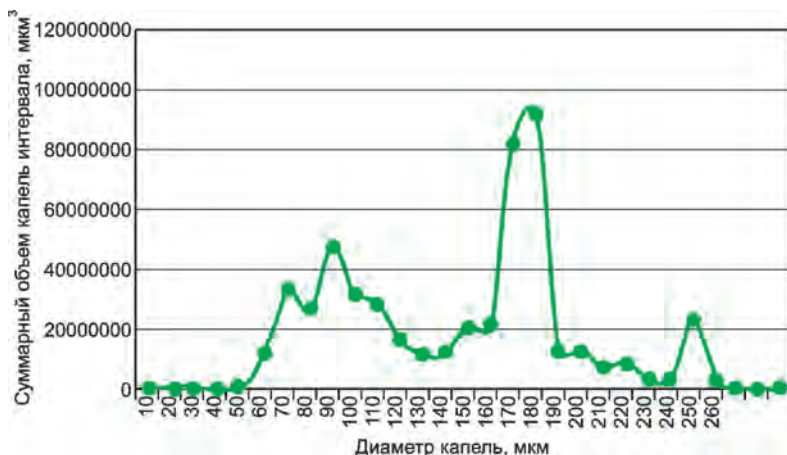


Рис. 56. Распределение капель по объемам

Экспериментальную кривую распределения капель по размерам аппроксимируем логарифмически нормальным законом распределения. Логарифмически нормальное распределение является двухпараметрическим:

$$f(d) = 1 / (\sigma d \sqrt{2\pi}) \exp(-(\lg d_i - \bar{d})^2 / 2\sigma^2),$$

где σ^2 – среднеквадратичное отклонение; $\bar{d}$ – средний размер.

Вычислив параметры распределения, построим соответствующую функцию и сравним её с экспериментальной кривой (рис. 57).

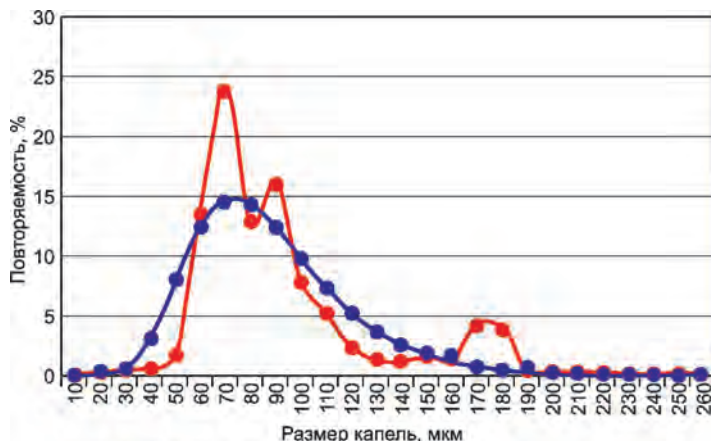


Рис. 57. Аппроксимация опытного распределения (красная кривая) логарифмически нормальным законом (синяя кривая)

Из графика следует, что при равных дисперсиях и среднем размере теоретическая функция не отображает экспериментальную кривую. И если такую функцию распределения взять за основу при косвенных методах измерения спектра капель или при решении задач по оптимизации процесса диспергирования жидкости, ошибка будет неизбежна.

Но это не означает, что логарифмически нормальное распределение не может отобразить результат эксперимента. В качестве примера обратимся к механизму дробления жидкости дисковым распылителем. Он неоднозначен. Дробление происходит и за счет центробежных сил, и за счет вибрации диска в плоскости вращения, и за счет неоднородности поверхности, что приводит к неравномерному растеканию жидкости. Возможны и другие факторы, и каждому из них присущ свой спектр размеров капель. Некоторые из механизмов дробления вносят существенный вклад в общий спектр капель, доля других, в пределах ошибки, незначительна. Эти процессы малоизучены и нуждаются в более детальном рассмотрении. Но уже ясно, что такие распределения должны быть аппроксимированы сложной функцией, являющейся суперпозицией (суммой) простых распределений, каждое из которых описывает свой механизм дробления.

Распределение, которое мы приводили в качестве примера, следует представить как сумму трех распределений, каждое из которых можно описать логарифмически нормальным законом (рис. 58).

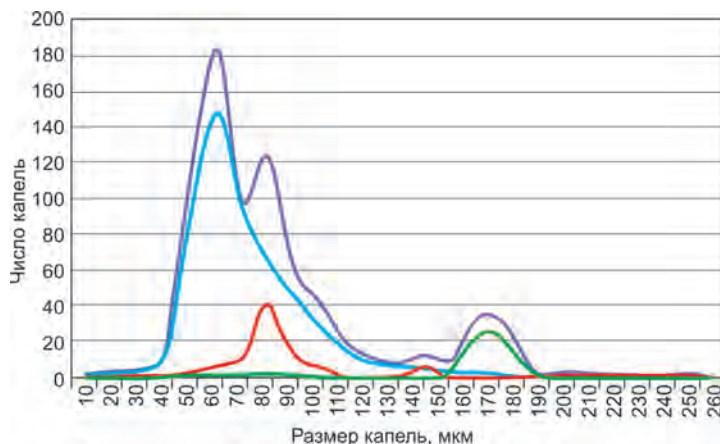


Рис. 58. Результирующая кривая спектра капель распыла в виде суммы трех логарифмически нормальных распределений

На графике наглядно представлено, что результирующая много-модовая кривая (фиолетовая) является суперпозицией (результатом наложения) трех одномодовых кривых – синей, красной и зеленой.

Такой подход усложнит конструкцию приборов косвенного измерения дисперсного состава капель распыла (оптических и лазерных), но значительно повысит точность измерения. Другими словами, чтобы правильно отградуировать прибор, надо иметь соответствующий эталон.

ГЛАВА XI. КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ И КОНЦЕНТРАЦИИ КАПЕЛЬ РАСПЫЛА

Измерение размеров капель распыла под оптическим микроскопом – процесс крайне трудоёмкий. Количество капель, которые необходимо измерить для того, чтобы обеспечить репрезентативность выборки, составляет 600-1200 шт. Причем такое количество капель необходимо набрать на каждой линии отбора пробы, а это 16 коллекторов, т.е. в среднем нужно измерить около 16000 капель. Задача не просто сложная, а практически невыполнимая.

Нами была разработана компьютерная программа графической обработки изображения капель. Капли осаждались на гидрофобную поверхность, что позволило им сохранить шарообразную форму, и переносились в гигростат восстановления размеров. После восстановления размеров капли фотографировались цифровой фотокамерой, установленной на тубусе микроскопа. В каждом кадре насчитывается 60-70 капель. После получения нужного количества фотографий начинается процесс цифровой обработки изображения. Вид диалогового окна программы обработки изображений представлен на рис. 59.

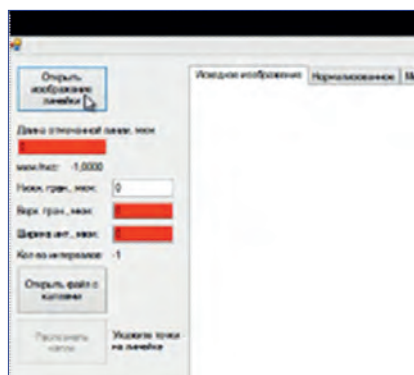


Рис. 59. Диалоговое окно программы обработки

В левой части окна находятся три кнопки:

- открыть изображение линейки;
- открыть файл с каплями;
- распознать капли.

В первую очередь следует нажать на кнопку **«открыть изображение линейки»**. Появится папка, в которой размещена микрофотография шкалы объект-микрометра при разных увеличениях (рис. 60). Выбираем нужное.

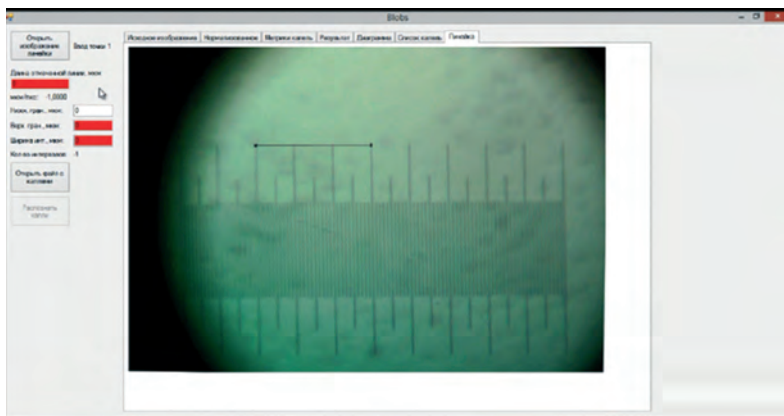


Рис. 60. Определение цены деления в пикселях

Затем проводим линию между большими делениями шкалы. Цена каждого большого деления 100 мкм. Тогда длина проведенной линии в данном конкретном случае составит 300 мкм.

Под кнопкой **«открыть изображение линейки»** располагаются четыре элемента управления «поле». Они окрашены красным цветом. В верхнее поле **«длина отмеченной линии»** необходимо ввести длину проведенной линии в мкм, в следующие поля **«Нижн. гран.»** и **«Верх гран.»** вводятся нижняя и верхняя границы диаметров капель, подлежащих расчету. В следующее поле вводится ширина интервала.

Значения границ обрабатываемого интервала размеров капель и ширина интервала группировки вводятся исходя из условий проведения эксперимента.

Затем нажатием на кнопку **«открыть файл с каплями»** выбираем изображение для обработки (рис. 61).

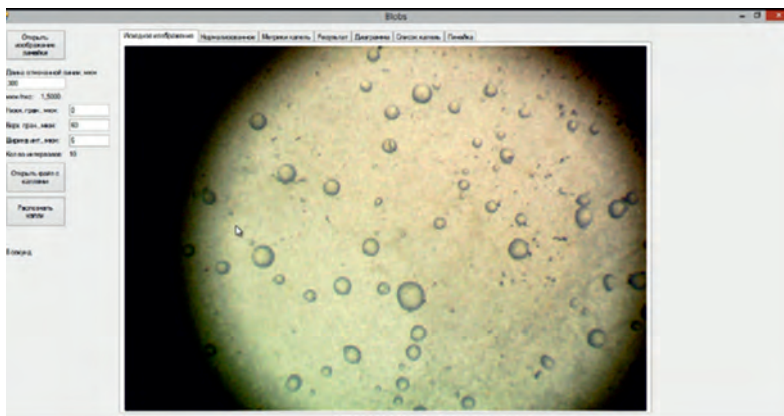


Рис. 61. Фотография капель до измерения их размеров

Далее следует команда **«распознать капли»** (рис. 62). За короткое время, от нескольких секунд до нескольких десятков секунд, происходят определение размеров капель, группировка в интервалы и построение гистограммы (рис. 63). Далее повторяется команда **«открыть файл с каплями»**, затем – **«распознать капли»**.

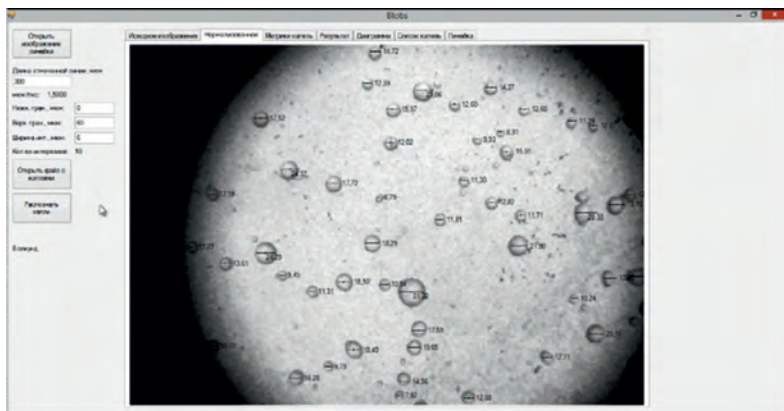


Рис. 62. Измерение диаметров капель

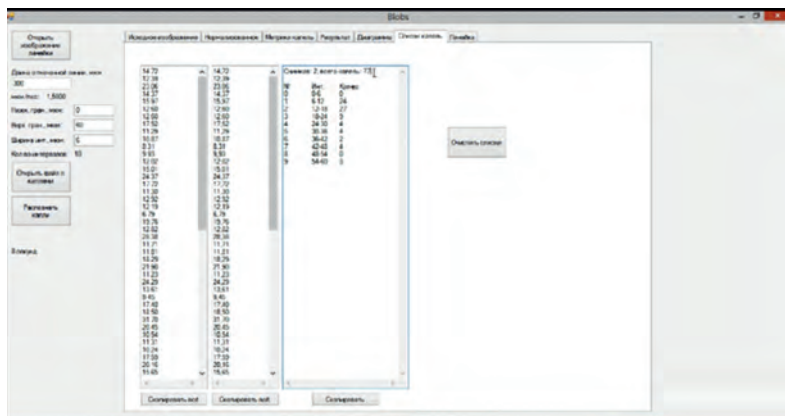


Рис. 63. Результаты измерения и группировки капель

Результаты измерения суммируются с предыдущими, и так до тех пор, пока не будет измерено количество капель, обеспечивающее репрезентативность выборки (рис. 64).

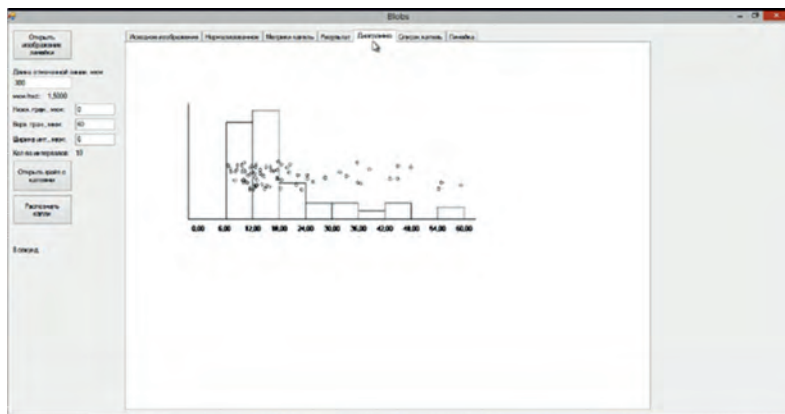


Рис. 64. Гистограмма распределения по размерам капель распыла

Для обработки результатов измерения в программе Microsoft Excel была создана специальная электронная табл. 11.

Таблица 11

Границы интервала, мкм		Концентрация капель в интервале		Среднее значение диаметра капли в интервале	Средний объем капли в интервале	Суммарный объем капель в интервале	
d_i	d_{i+1}	n_i , шт.	%	$d_{cp.}$, мкм	$V_{cp.}$, мкм ³	$\sum V_i$, мкм ³	%

Первые три столбца табл. 11 содержат данные измерения размеров восстановленных капель программой графической обработки изображения. Здесь d_i и d_{i+1} – границы интервала группировки, n_i – концентрация капель в интервале, $n_{i\%}$ – процентное содержание капель в интервале, которое вычисляется по формуле

$$n_{i\%} = (n_i / \sum n_i) \times 100\%;$$

средний диаметр капли в интервале $d_{cp.}$:

$$\bar{d} = \frac{d_i + d_{i+1}}{2};$$

средний объем капли в интервале $V_{cp.}$:

$$\bar{V} = 0,523 \bar{d}^3;$$

суммарный объем капли в интервале $\sum V_i$:

$$\sum V_i = n_i \times V_i.$$

Процент от общего объема капли в интервале V_i определяется по формуле

$$V_{i\%} = (V_i / \sum V_i) \times 100\%.$$

Все формулы занесены в соответствующие ячейки табл. 11. Таким образом, сразу, после внесения в таблицу значений интервала группировки и концентрации капель в интервале (происходит автоматически после команды «очистить список»), производится расчет всех параметров спектра.

Чтобы подтвердить возможности компьютерной программы графической обработки изображения капель, были проведены сравни-

тельные испытания двух образцов форсунок компании «Lechler» с небольшим расходом:

- зеленая – расход 0,4 л/мин при давлении 3 атм;
- оранжевая – расход 0,6 л/мин при давлении 3 атм.

Эксперимент проводился в аэрозольной камере. Предметные стекла выкладывались на центральную площадку пробоотборника на уровне, отстоящем от форсунки на 1 м. Время экспозиции 1 с. После перекрытия аэрозольного потока коллектор выдерживался на пробоотборнике 20 мин. За это время на коллектор успевали осесть все капли размером от 20 мкм.

В табл. 12 приведены численные значения результатов измерения размеров капель и их счетной концентрации и вычисленные значения параметров распределения оранжевой форсунки.

Таблица 12

Результат испытаний оранжевой форсунки

Среднее значение диаметра капли в интервале		Средний объем капли в интервале, мкм ³	Суммарный объем капель в интервале, мкм ³	Концентрация капель в интервале, шт/см ²
линейное	объемное			
10	15,87	2,1	10430	5
30	33,02	18 864	1 188 432	63,0
50	51,92	73 360	4 915 120	67,0
70	71,40	190 736	14 305 200	75,0
90	91,10	396 144	40 802 832	103,0
110	110,90	714 736	73 689 282	103,1
130	130,76	1 171 664	168 719 616	144,0
150	150,66	1 792 080	216 841 680	121,0
170	170,59	2 601 136	236 703 376	91,0
190	190,52	3 623 984	260 926 848	72,0
210	210,48	4 885 776	180 773 712	37,0
230	230,43	6 411 664	115 409 952	18,0
250	250,40	8 226 800	164 536 000	20,0
270	270,37	10 356 336	134 632 368	13,0
290	290,34	12 825 424	89 777 968	7,0
310	310,32	15 659 216	31 318 432	2,0
330	330,30	18 882 864	-	-

Продолжение табл. 12

Среднее значение диаметра капли в интервале		Средний объем капли в интервале, мкм ³	Суммарный объем капель в интервале, мкм ³	Концентрация капель в интервале, шт/см ²
линейное	объемное			
350	350,29	22 521 520	45 043 040	2,0
370	370,27	26 600 336	79 801 008	3,0
390	390,26	31 144 464	124 577 856	4,0
410	410,24	36 179 056	-	-
430	430,23	41 729 264	41 729 264	1,0
450	450,22	47 820 240	-	-
470	470,21	54 477 136	-	-
490	490,20	61 725 104	-	-

По аналогичной схеме проведены испытания зеленой форсунки. Результаты этих испытаний приведены в табл. 13.

Таблица 13

Результат испытаний зеленой форсунки

Среднее значение диаметра капли в интервале		Средний объем капли в интервале, мкм ³	Суммарный объем капель в интервале, мкм ³	Концентрация капель в интервале, шт/см ²
линейное	объемное			
10	15,87	2 096	-	-
30	33,02	18 864	528 192	28,0
50	51,92	73 360	3 888 080	53,0
70	71,40	190 736	14 495 936	76,0
90	91,10	396 144	38 822 112	98,0
110	110,90	714 736	71 473 600	100,0
130	130,76	1 171 664	82 016 480	70,0
150	150,66	1 792 080	112 901 040	63,0
170	170,59	2 601 136	140 461 344	54,0
190	190,52	3 623 984	105 095 536	29,0
210	210,48	4 885 776	131 915 952	27,0
230	230,43	6 411 664	44 881 648	7,0
250	250,40	8 226 800	106 948 400	13,0
270	270,37	10 356 336	82 850 688	8,0
290	290,34	12 825 424	38 476 272	3,0

Среднее значение диаметра капли в интервале		Средний объем капли в интервале, мкм ³	Суммарный объем капель в интервале, мкм ³	Концентрация капель в интервале, шт/см ²
линейное	объемное			
310	310,32	15 659 216	62 636 864	4,0
330	330,30	18 882 864	56 648 592	3,0
350	350,29	22 521 520	67 564 560	3,0
370	370,27	26 600 336	-	-
390	390,26	31 144 464	-	-
410	410,24	36 179 056	-	-
430	430,23	41 729 264	-	-
450	450,22	47 820 240	-	-
470	470,21	54 477 136	-	-
490	490,20	61 725 104	-	-

На основании данных табл. 12, 13 рассчитаны основные показатели дисперсных характеристик спектров распыла оранжевой и зелёной форсунок (табл. 14).

Таблица 14

Основные показатели дисперсных характеристик

Тип форсунок	Модальный диаметр капли, мкм	Средний диаметр (линейный) капли, мкм	Средний кубический диаметр (объемный) капли, мкм ³	Измеренный суммарный объем капель, дм ³ /га	Среднее квадратическое отклонение
Оранжевая	110	125,9	157,7	181,9	65,3
Зеленая	110	122,8	150,8	114,0	60,0

Как следует из табл. 14, основные показатели распределений – модальный, средний, средний кубический диаметры, среднее квадратическое отклонение для обеих форсунок совпадают в пределах ошибки. Различаются значения суммарного объема (массы) капель. Объем осевших капель для оранжевой форсунки в 1,6 раза больше того же параметра для зеленой. Это соотношение в пределах ошибки совпадает с пропорцией паспортных расходных значений для этих форсунок – 1,5.

На рис. 65, 66 приведены графики распределения по размерам и объемам спектра капель распыла для оранжевой и зеленой форсунок. Сравнение графических представлений картины распыла позволяет сделать вывод, что свойства оранжевой и желтой форсунок в пределах ошибки совпадают с учетом разницы в величине расхода.

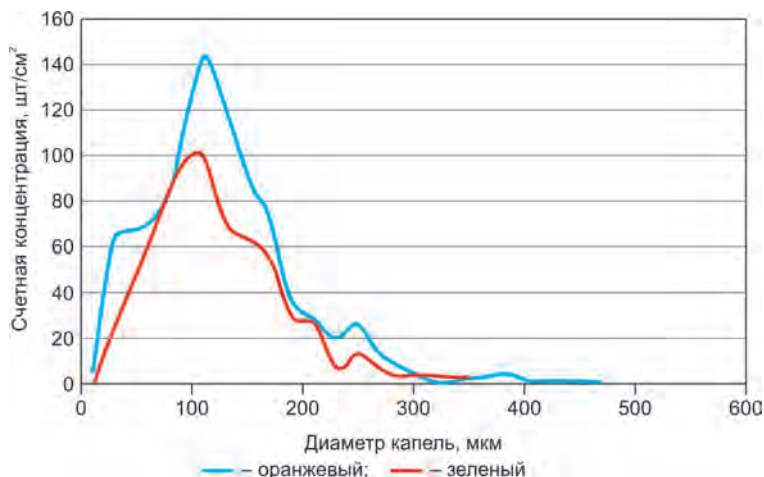


Рис. 65. График распределения капель по размерам

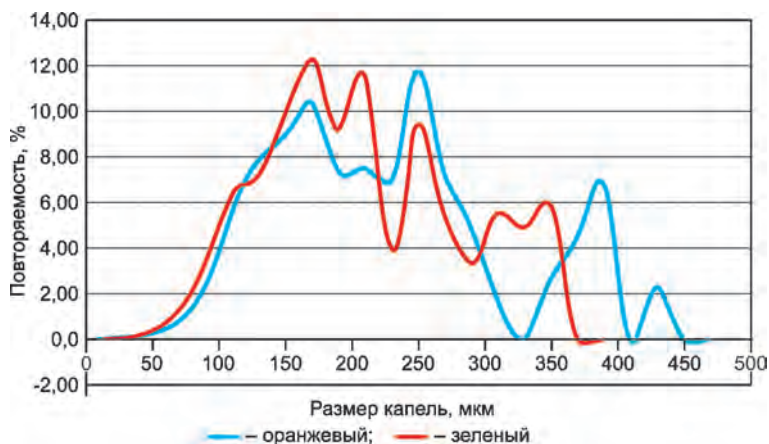


Рис. 66. График распределения капель по объемам

Экспериментальные кривые распределения капель по размерам попробуем аппроксимировать двухпараметрическим логарифмически нормальным законом распределения.

$$f(d) = 1 / (\sigma d \sqrt{2\pi}) \exp(-(\lg d_i - \bar{d})^2 / 2\sigma^2),$$

где среднеквадратичное отклонение

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lg d_i - \bar{d})^2,$$

а средний размер

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_i \lg d_i.$$

На рис. 67, 68 представлены графики распределения по размерам капель распыла для оранжевой и зеленой форсунок. Там же представлена теоретическая кривая в виде двухпараметрического логарифмически нормального закона, коэффициенты которого вычислены по вышеприведенным формулам.

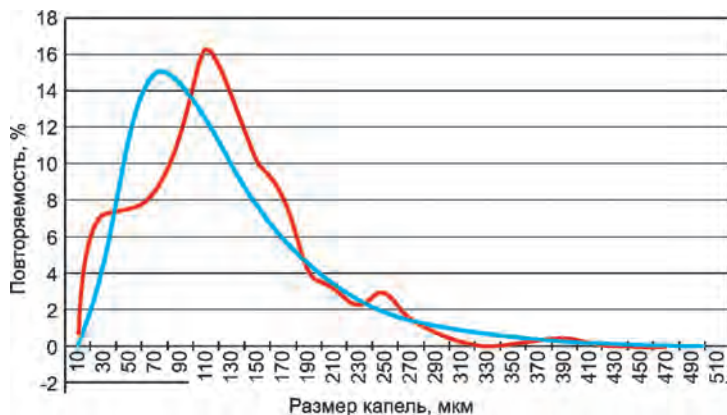


Рис. 67. График распределения спектра капель распыла и его аппроксимация логарифмически нормальным законом (оранжевая форсунка)

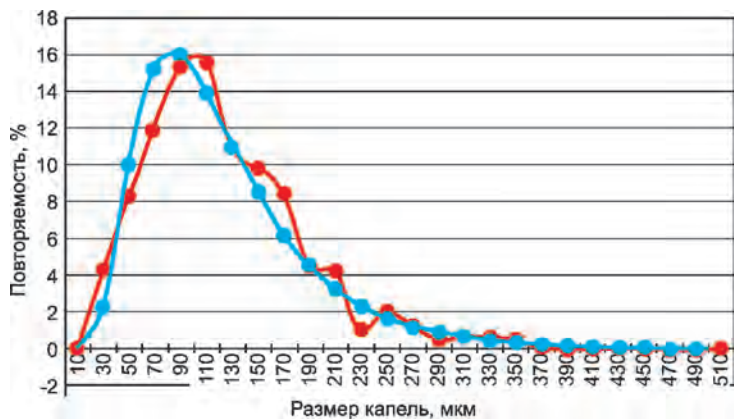


Рис. 68. График распределения спектра капель распыла и его аппроксимация логарифмически нормальным законом (зеленая форсунка)

Как следует из графиков, теоретическая функция в первом приближении достаточно хорошо аппроксимирует экспериментальную кривую. Вместе с тем наблюдается некоторое смещение моды распределения. Расчеты показывают, что попытка подогнать модальный диаметр теоретической функции под экспериментальную приведет к серьезному изменению численных расчетных значений средних линейного и объемного диаметров, а это может привести к отличиям моделируемой картины воздействия от реальной.

На графике экспериментальной кривой прослеживаются небольшие выбросы, которые могут носить в том числе неслучайный характер и быть показателем полимодальности опытной кривой. Но делать окончательные выводы в рамках настоящей работы рано. Полимодальность функции распределения по размерам капель распыла должна стать предметом отдельного изучения.

ГЛАВА XII. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОТИПНЫХ ФОРСУНОК

Эксперименты проводились в аэрозольной камере (измерительном стенде). Были отобраны три однотипные (ST) форсунки с размерами сопла 5,1×2 мм – № 1; 4,5×2,2 мм – № 2 и 3,5×2,4 мм – № 3 (рис. 69) от трех разных производителей – «ARAG», «Lechler» и «TeeJet».

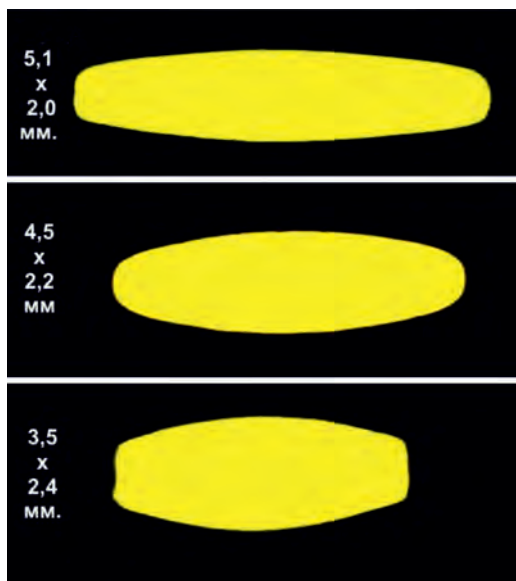


Рис. 69. Форма и размер сопла форсунки

Различия в размерах и форме сопла форсунок, очевидно, должны влиять на спектр образовавшихся капель [25]. Условия проведения эксперимента были идентичны для всех.

Форсунки были установлены на штанге под потолком камеры. Сопло форсунки выставлялось параллельно стенке камеры. Под форсункой на расстоянии 1 м вдоль линии, ориентированной параллельно соплу форсунки, были установлены пробоотборники. Всего было установлено 4 пробоотборника, и информация о дисперсном составе

капель поступала из четырех зон поля орошения. Нулевая зона – непосредственно под форсункой, зона № 1 – на расстоянии 25 см от нулевой и далее зоны № 2 и № 3 – с шагом 25 см друг от друга.

На пробоотборники устанавливались предметные стекла, покрытые водоотталкивающим слоем.

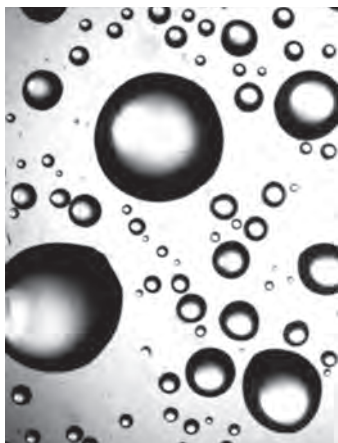
Подача в форсунку 10%-ного раствора NaCl под давлением 4 бар осуществлялась при закрытой заслонке, и только после выхода форсунки на рабочий режим заслонка отодвигалась и капли попадали в камеру. Время экспозиции выдерживалось равным ~ 1 с. Затем заслонка перекрывала доступ аэрозоля в камеры, подача раствора отключалась. Предметные стекла выдерживались в камере около 0,5 ч, до полного осаждения капель, и затем переносились в камеру восстановления. Следует отметить, что за время выдержки в камере полного испарения капли не наблюдалось, что, очевидно, было связано с достаточно высокой влажностью в камере и наличием в растворе гигроскопической соли.

Экспонированные предметные стекла переносились в камеру восстановления и помещались на предметный столик микроскопа. Цифровая камера которого передавала в режиме реального времени изображение капель на монитор компьютера. Для начала производился контрольный снимок наблюдаемых капель. Предметный столик не передвигался, что позволило, сравнивая текущее изображение капель с контрольным, зафиксировать завершение процесса восстановления размеров капель.

Затем производилось фотографирование изображения капель. Площадь каждого отдельного кадра – около 6 мм². Число кадров в каждой зоне выбиралось таким, чтобы общее число капель было не менее 600 шт. После набора нужного количества снимков производилась графическая обработка изображения с помощью созданной авторами специальной компьютерной программы [23].

Сравнение фотоснимков капель в различных зонах поля орошения показало достаточно высокую степень неоднородности как по дисперсным характеристикам, так и по плотности концентрации капель.

На рис. 70 представлены фотоснимки капель, диспергированных форсункой «Lechler» и осажденных на предметные стекла в различных зонах поля орошения.



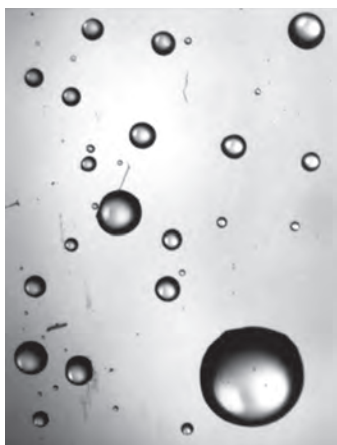
Зона 0



Зона 1



Зона 2



Зона 3

Рис. 70. Фотоснимок капель на предметном стекле

Визуальный анализ фотоснимков говорит в первую очередь о большом количестве мелких капель в спектре распыла. В особенности это имеет место в центральной зоне – зоне 0. Одновременно присутствуют капли очень больших размеров – высокая степень полидисперсности. В зоне 1 количество мелких капель, а следова-

тельно, и степень полидисперсности значительно ниже. Зоны 2, 3 характеризуются более низкой концентрацией капель. Степень полидисперсности – средняя.

Для детальной оценки полученных результатов проведем количественный анализ дисперсных параметров капель распыла исследуемых форсунок.



Рис. 71. График распределения по размерам капель распыла в разных зонах

Как следует из приведенных кривых (рис. 71), модальные размеры в первых трех зонах мало отличаются друг от друга. Значение модального диаметра колеблется в пределах 60-80 мкм. В зоне 3 наблюдается резкое повышение размеров модального диаметра до 220 мкм. Похожая ситуация и со средними линейными размерами. Значения средних размеров диаметров остаются в пределах 130-150 мкм, и в пределах ошибки их можно считать равными, а в зоне 3 резкий скачок до 230 мкм.

Со средним объемным диаметром дело обстоит иначе. Именно в зоне 0 средний объемный диаметр максимален. И это при том, что модальный и средний линейный диаметры в этой зоне самые маленькие. Это говорит о высокой степени полидисперсности спектра капель в этой зоне. Минимальное значение степени полидисперсности наблюдается в зоне 3.

Модальные, средние линейные и средние объемные диаметры мало отличаются друг от друга. Спектр капель именно этой зоны наиболее предпочтителен для проведения промышленных мероприятий по химической защите растений.

В табл. 15 приведены численные значения диаметров – модального, линейного и объемного в разных зонах поля орошения. Графически эти данные представлены на рис. 72.

Таблица 15

Распределение размерных параметров в зоне орошения

Зона	Модальный размер	Средний диаметр (линейный), мкм	Средний кубичный диаметр (объемный), мкм ³
0	60	127,8	318
1	80	147,6	282
2	65	131,0	191
3	220	233,0	251

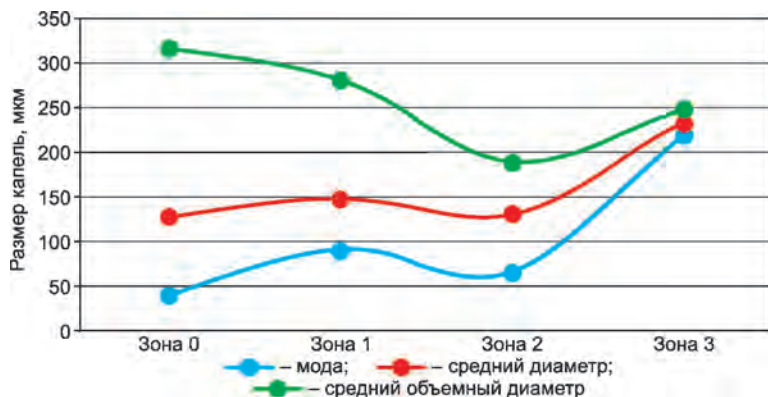


Рис. 72. Графики изменения размерных параметров спектра капель по зонам

На графике изменения размерных параметров спектра капель по зонам (см. рис. 72) наглядно представлено, как уменьшается разность средних диаметров по зонам, и они практически сходятся в последней зоне 3.

Похожая картина наблюдается и в спектре распыла форсунки «TeeJet» (рис. 73). Как и при работе форсунки «Lechler» мода распределения в зоне 3 сдвинута в сторону больших размеров.

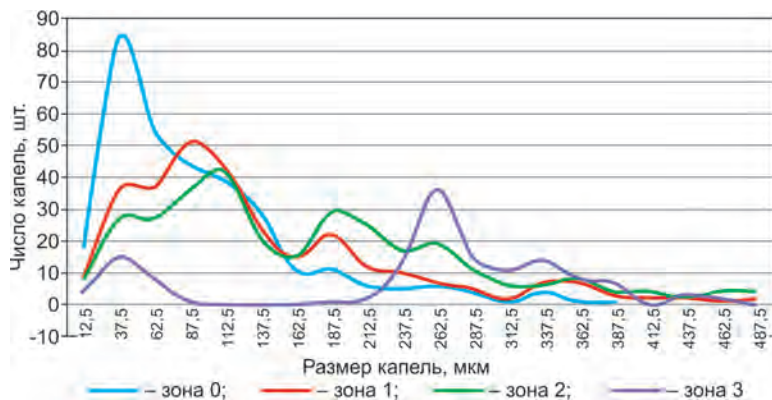


Рис. 73. График распределения по размерам капель распыла в разных зонах

На графике изменения размерных параметров спектра капель по зонам (рис. 74) наблюдается та же направленность – размеры диаметров в последней зоне 3 сходятся.

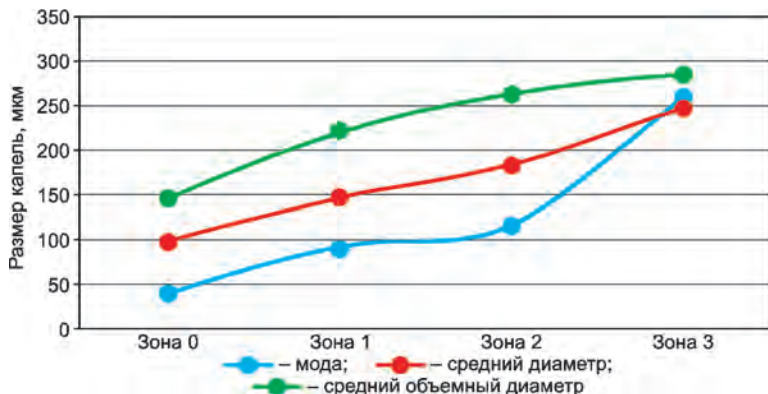


Рис. 74. Графики изменения размерных параметров спектра капель по зонам

Изменения численных значений диаметров, представленные на рис. 74, приведены в табл. 16.

Таблица 16

Распределение размерных параметров в зоне орошения

Зона	Модальный размер	Средний диаметр (линейный), мкм	Средний кубический диаметр (объемный), мкм ³
0	40	96,8	148
1	90	144,6	224
2	115	182,9	266
3	260	247,7	288

По иному распределены по зонам дисперсные характеристики спектра капель, распыленных форсункой «ARAG» (рис. 75, 76).

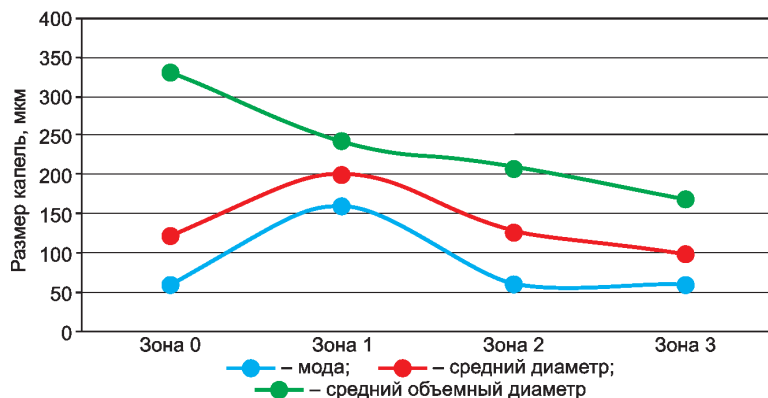


Рис. 75. Графики изменения размерных параметров спектра капель по зонам

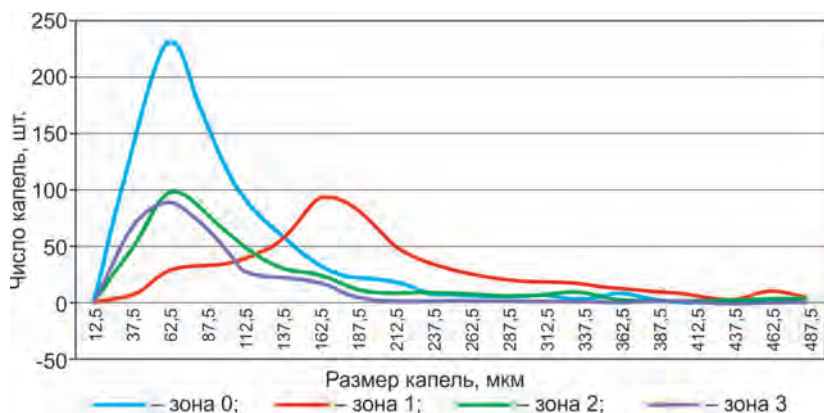


Рис. 76. График распределения по размерам капель распыла в разных зонах

Как следует из графиков, приведенных на рис. 75, 76, сдвиг моды распределения в сторону больших размеров наблюдается не в зоне 3, как для форсунок Lechler и TeeJet, а в зоне 2. Соответственно, в этой зоне наблюдается и сходимость размерных параметров спектра распыла.

Изменения численных значений диаметров, представленные на рис. 75, приведены в табл. 17.

Таблица 17

Распределение размерных параметров в зоне орошения

Зона	Модальный размер	Средний диаметр (линейный), мкм	Средний кубический диаметр (объемный), мкм ³
0	60	122,0	334
1	160	200,0	224
2	60	126,0	211
3	60	98,5	170

Экспериментальные кривые распределения по размерам спектров капель по каждой зоне приведены на рис. 77-80.

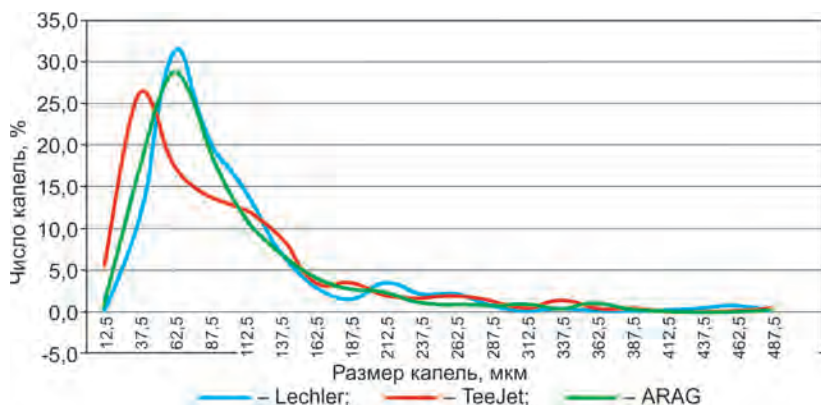


Рис. 77. Экспериментальные кривые распределения по размерам спектров капель в зоне 0

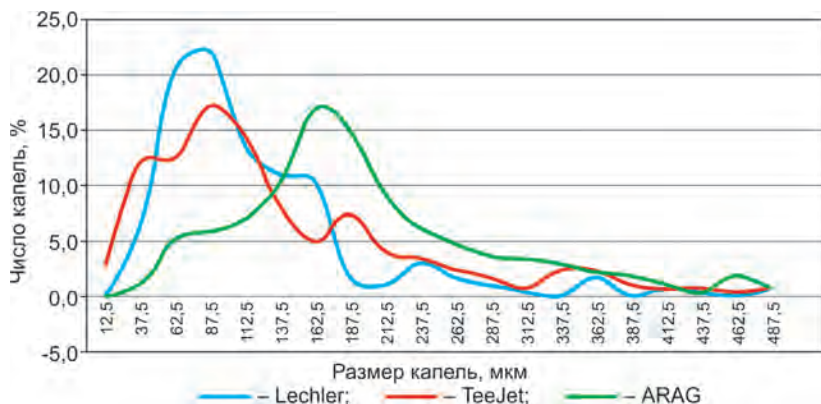


Рис. 78. Экспериментальные кривые распределения по размерам спектров капель в зоне 1

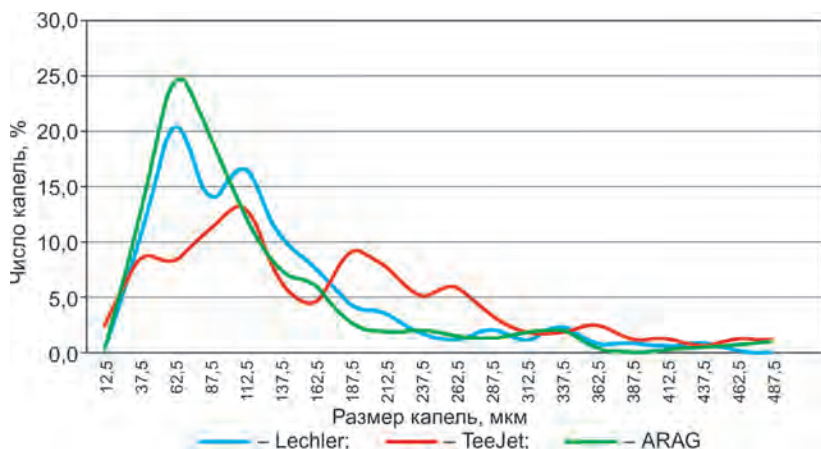


Рис. 79. Экспериментальные кривые распределения по размерам спектров капель в зоне 2

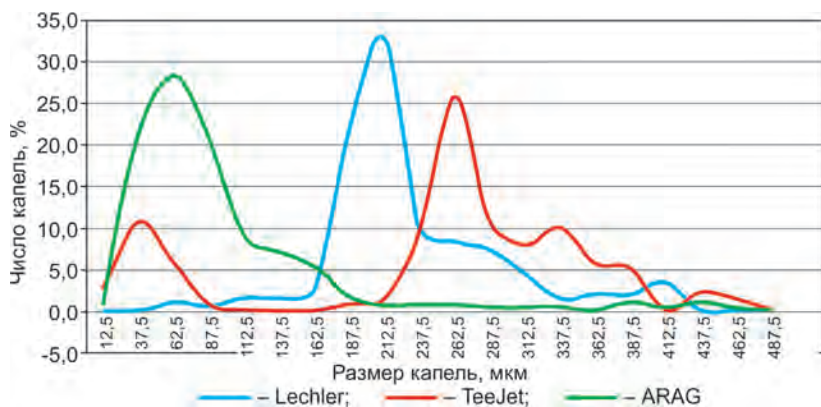


Рис. 80. Экспериментальные кривые распределения по размерам спектров капель в зоне 3

Анализ графиков позволяет сделать вывод: характер неоднородности и ее распределение на поле орошения для форсунок компаний Lechler и TeeJet имеют аналогичную направленность, тогда как неоднородность поля орошения форсунка компании ARAG имеет иную геометрию.

С чем это может быть связано? Возможно, влияет геометрия форсунки. На рис. 69 представлены макрофотографии сопел форсунок. Формы и размеры всех трех форсунок отличаются друг от друга. Можно предположить, что именно это является причиной различий в результатах их действий. Конечно, эти выводы носят предварительный характер и предполагают продолжение исследований.

ГЛАВА XIII. МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-ТЕСТИРОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАПЕЛЬ РАСПЫЛА

Для эффективного и в то же время экологически безопасного применения средств защиты растений необходимо, чтобы машины и оборудование для их внесения обеспечивали качественные показатели технологического процесса – густоту и равномерность покрытия, соответствующий технологическим требованиям дисперсный состав капель распыла, оптимальное распределение препарата по зонам, позволяющее повысить эффективность его действия на всех уровнях. Густоту покрытия и дисперсность распыла определяют с помощью карточек из мелованной бумаги размерами 50×70 мм. В качестве рабочей жидкости в этом случае используется 1,5%-ный раствор нигрозина.

Учетные карточки, например в садоводстве, развешивают на растении по определенной схеме в зависимости от культуры с тем, чтобы охватить ими весь объем или поверхность. Неравномерность распределения препарата определяют путем учета количества капель по верху и низу листьев (по ярусам и зонам кроны) и по растению (дереву) в целом. К недостаткам этого метода можно отнести то, что нигрозин очень стойкий органический краситель и его попадание на нецелевые объекты нежелательно.

Капли размерами в десятки и сотни микрон будут достаточно широко растекаться по поверхности, и размер пятна, даже приближенно, не будет равен размеру самой капли. В этом случае будет выполняться зависимость:

$$D_{\text{капли}} = \Delta D_{\text{пятна}},$$

где Δ – коэффициент пропорциональности. Причем этот коэффициент не постоянен для всего диапазона размеров капель.

Мелкие капли могут оставить след, мало отличающийся от их размера, в то время как след крупной капли намного превысит ее диаметр. Определить этим методом размер капли, осажденной на карточку, не представляется возможным.

Для оценки качественных показателей химзащитных работ применяют в том числе и карточки из водочувствительной бумаги. Это плотная бумага со специальным желтым покрытием, которое окрашивается в темно-синий цвет при попадании на него капель воды.

При использовании этой бумаги для оценки качества опрыскивания в водный раствор не требуется добавлять краситель. Надо просто поместить бумагу на обрабатываемую поверхность. После опрыскивания водочувствительная бумага в месте попадания капель окрасится в синий цвет, т.е. появится рисунок распределения капель по поверхности карточки. Поверхностный водочувствительный слой гигроскопичен и на воздухе, впитывая влагу, окрашивается и становится непригодным для дальнейшего использования.

Высокая гигроскопичность водочувствительного слоя приводит к тому, что капля воды, попав на водочувствительный слой, растекается, образуя пятно произвольной формы. Конечно, и в этом случае определить размер капли, идентифицируя его с геометрией пятна, практически невозможно.

Есть еще один фактор, который может существенно исказить результат измерения, – испаряемость капель.

Численные значения времени испарения капель разных размеров в условиях различных температур и влажности внешней среды приведены в табл. 18.

Таблица 18

Время испарения капель

Диаметр капли, мкм	Т = 20°C, влажность 80%	Т = 25°C, влажность 60%	Т = 30°C, влажность 50%
	время полного испарения капли		
25	2	1,1	0,6
50	7	3,7	2,1
75	16	9	4,7
100	50	30	14

Сопоставив скорость испарения капель со скоростью их осаждения, получим числовые значения скорости осаждения капель разных размеров (по Стоксу) (табл. 19).

Скорость осаждения капель

Диаметр капли, мкм	Скорость осаждения, см/с	Время осаждения на 100 см, с
10	0,3	340
20	1,2	86
30	2,6	38
40	4,7	22
50	7,4	13,6
60	11	9,4
70	14	7
80	19	5,2
90	24	4,2
100	29	3,4

Сравнительный анализ табл. 18 и 19 показывает, что капли размерами менее 50 мкм практически не могут достичь поверхности защищаемого объекта, особенно если учесть, что в процессе осаждения они продолжают испаряться, их размер уменьшается и, соответственно, уменьшается скорость осаждения. Естественно, этот процесс имеет место и при осаждении капель на коллектор для дальнейшего измерения их размеров и значительно искажает результаты измерения.

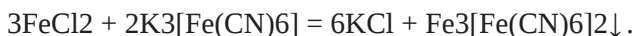
Авторами разработаны и изготовлены карточки для определения качественных показателей процесса опрыскивания, которые свободны от этих недостатков. Они изготавливаются из плотной бумаги, пропитанной специальным раствором, содержащим индикатор. Распыляемый рабочий раствор содержит неорганическое химическое соединение, образующее с индикатором цветной нерастворимый осадок. Карточки негигроскопичны, Цветная картина распределения капель закрепляется на них и не меняет своих свойств. Рабочий раствор не содержит красителей и абсолютно безвреден.

В табл. 20 приведено несколько возможных разновидностей химических реакций, дающих цветные осадки [26, 27].

Цветные химические реакции

Определяемый ион	Реактив	Чувствительность	Цвет осадка
Cu^{2+}	$\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ – желтая кровяная соль	0,0001 мг/мл	Красно-коричневый
Fe^{3+}	$\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ – желтая кровяная соль	0,03 мг/мл	Синий
Fe^{3+}	NH_4CSN – роданит аммония	-	Кроваво-красный
Fe^{2+}	$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ – красная кровяная соль	0,0001 мг/мл	Темно-синий

Была выбрана реакция двухвалентного железа (хлористое железо) с гексацианоферратом (III) калия (красная кровяная соль), в результате которой образуется синий осадок (турнбулева синь).



Такой выбор химических реагентов был обусловлен высокой чувствительностью реакции, их толерантностью по отношению к растениям, высоким контрастом получаемого изображения.

На рис. 81 представлена фотография поверхности карточки с осажденными на нее каплями слабого раствора хлористого железа.

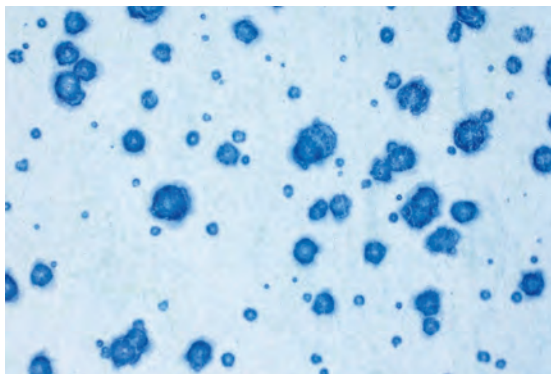


Рис. 81. Макроизображение поверхности карточки (Fe_2)

Также можно предложить реакцию двухвалентной меди с гексациано-ферратом (IV) калия (желтая кровяная соль), в результате которой образуется красно-коричневый осадок (рис. 82).

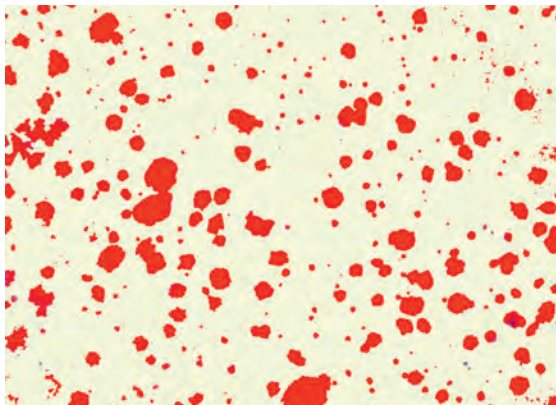


Рис. 82. Макроизображение поверхности карточки (Cu_2)

Как было сказано, карточки негигроскопичны, цветная картина распределения капель закреплена на их поверхности и не меняет своих свойств.

Предлагаемый способ определения качества опрыскивания свободен и от влияния такого серьезного фактора, как испарение. На водочувствительной бумаге цветные следы капель образуются при действии воды на состав подложки, и в случае изменения размеров капли (или ее полного испарения) площадь следа капли также изменится (или не проявится вообще).

Карточки экспресс-анализа, чувствительные к солям железа или меди, реагируют не на воду, а на растворенное в ней химическое соединение, масса которого в растворе не меняется. Таким образом, процесс испарения растворителя (воды) не будет влиять на размеры следов капель на карточке.

Что касается самого процесса испарения – он будет иметь место только до того момента, пока снижение упругости пара над каплей не достигнет значения относительной влажности в окружающей среде. Как следует из приведенного графика на рис. 83, при увели-

чении концентрации соли в капле до 30-40% испарение прекращается, так как градиент влажности у поверхности капли становится нулевым.

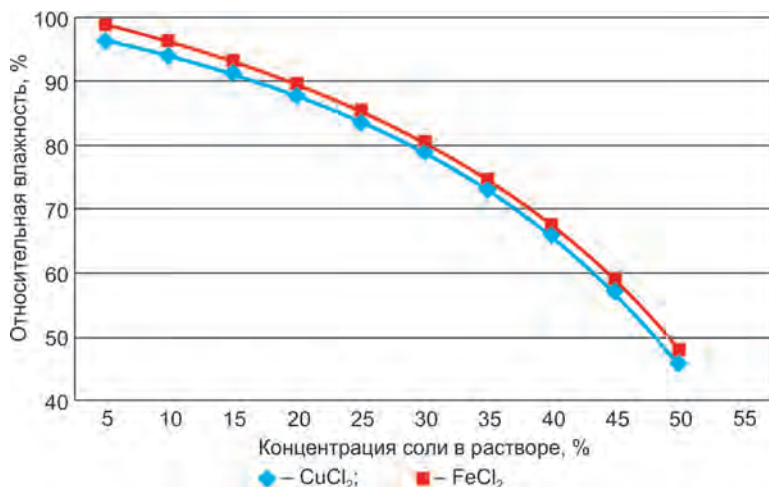


Рис. 83. Относительная влажность над растворами солей

Экспресс-анализаторы качества опрыскивания изготавливаются в виде карточек размерами 90×40 мм или в виде ленты шириной 40 мм и длиной 3 м.

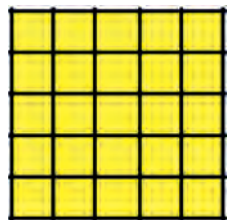
Бумага пропитывается раствором гексацианоферрата (III) калия концентрацией 5-7%. После высушивания бумага приобретает желтый (соломенный) цвет и готова к употреблению.

На карточки (рис. 84а) наносится рисунок в виде квадратов. Площадь каждого квадрата 1 см². Просчитывается количество капель в отдельных квадратах, и определяется их среднее количество в 1 см² по формуле

$$\bar{N} = \sum_1^n N_i / n,$$

где $\bar{N}$ – средняя концентрация капель на конкретном участке поля орошения, N_i – концентрация капель в отдельных квадратах, n – число просчитанных квадратов.

На ленту (рис. 84б) наносится шкала с ценой деления 1 см. Нулевая отметка располагается в середине ленты и градуируется от неё в обе стороны. Цвет делений с каждой стороны разный – красный и синий.



a

Лента располагается под форсункой таким образом, чтобы нулевая отметка находилась точно на оси, проходящей через центр форсунки.

Каждая сторона просчитывается отдельно, и на основании этих результатов рассчитывается неоднородность численной концентрации капель относительно центральной оси факела.



б

*Рис. 84. Экспресс-анализаторы качества опрыскивания:
a – в виде карточки; б – в виде ленты*

Для измерения концентрации капель их изображение на ленте обрабатывается с помощью портативного цифрового USB-микроскопа Levenhuk DTX 90 (рис. 85).



*Рис. 85. USB-микроскоп
Levenhuk DTX 90*

Микроскоп Levenhuk DTX 90 – современный профессиональный USB-микроскоп для сверхточных работ. Диапазон увеличения – от 10 до 300 крат. Оснащен 5-мегапиксельной камерой. Комплектуется специальным штативом и основанием с измерительной шкалой (8 см по оси x , 7 см – по оси y) и двумя зажимами для закрепления образца под камерой.

Микроскоп позволяет получать снимки высокого качества и разрешения. Подключается к компьютеру или ноутбуку через стандартный порт USB 2.0.

Технические характеристики:

- USB-микроскоп на профессиональном штативе;
- съемная цифровая камера 5 Мпикс;
- питание микроскопа через порт USB 2.0;
- встроенная подсветка из 8 светодиодов белого цвета с плавной регулировкой яркости;
- фокусировка ручная, в пределах от 0 мм до 150 мм;
- фото *.jpeg, 2592×1944, 2048×1536, 1600×1200, 1280×960;
- число мегапикселей – 5;
- возможность сохранения изображений и съемка видео;
- измерение расстояний, площадей, углов и радиусов увеличенных объектов;
- камера совместима с Windows XP/Vista/7/8/10.

Программа обработки карточек экспресс-тестирования

Изучение и обработка изображения происходят с помощью разработанной авторами компьютерной программы распознавания капель. Определяются равномерность покрытия в процентах к общей площади на различных участках зоны орошения, площадь покрытия карточки следами капель, процентная доля покрытия относительно площади карточки и численная концентрация капель на площади орошения.

Равномерность распределения рабочей жидкости определяется сравнительным анализом пигментированной красителем площади различных участков поверхности карточки или ленты. Измерение численной концентрации капель осуществляется путем определения количества их отдельных цветных отпечатков.

Интерфейс программы представлен на рис. 86. В верхнем левом углу обозначены две команды – «файл» и «линейка».

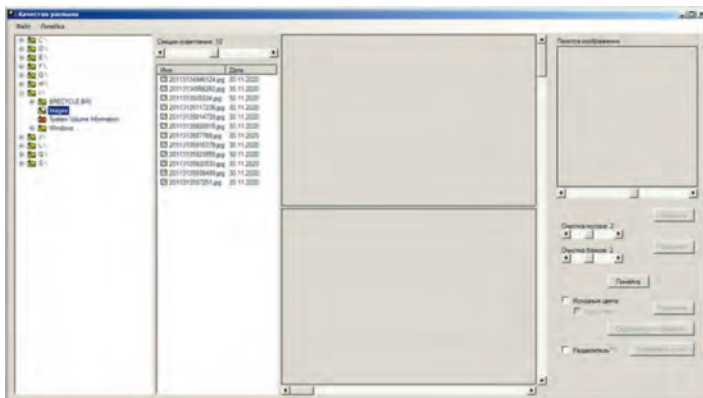


Рис. 86. Интерфейс компьютерной программы обработки карточек экспресс-анализа качества опрыскивания

Перед началом измерений необходимо определить цену деления контрольной миллиметровой линейки в пикселях. Для этого по команде «линейка» изображение измерительного инструмента загружается в программу (рис. 87).

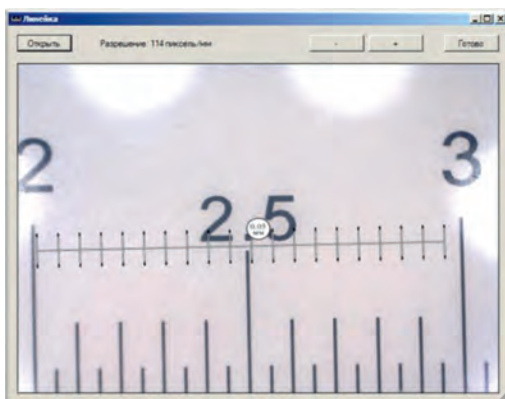


Рис. 87. Определение цены деления линейки

Размер линейки (мм) сравнивается с эталоном в пикселях. Определяется цена деления, которая высвечивается вверху окна слева. В демонстрируемом примере имеется разрешение 114 пикс/мм.

После определения цены деления линейки командой «файл» выбирается изображение экспонированной карточки и загружается в программную базу для дальнейшей обработки.

В первую очередь программа осуществляет цветовую трансформацию изображения пятен и поверхности карточки с целью повышения контраста отпечатка (рис. 88). Затем изображение очищается от посторонних вкраплений и бликов (рис. 89).

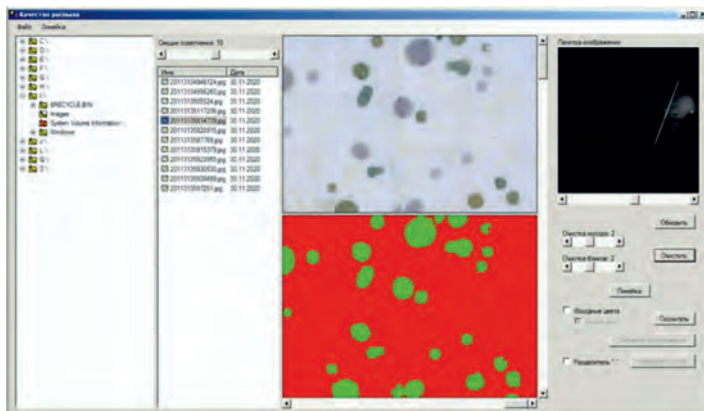


Рис. 88. Подготовка изображения поверхности карточки

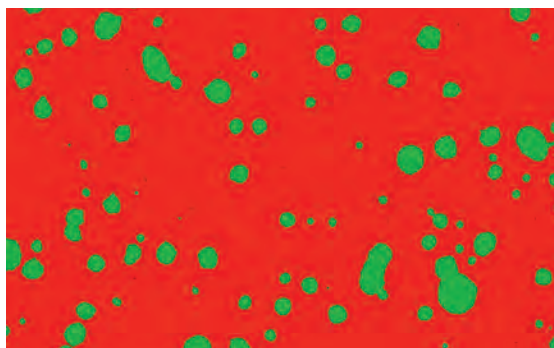


Рис. 89. Изображение карточки, подготовленное к просчету

После подготовки изображения следует команда «посчитать» (рис. 90).

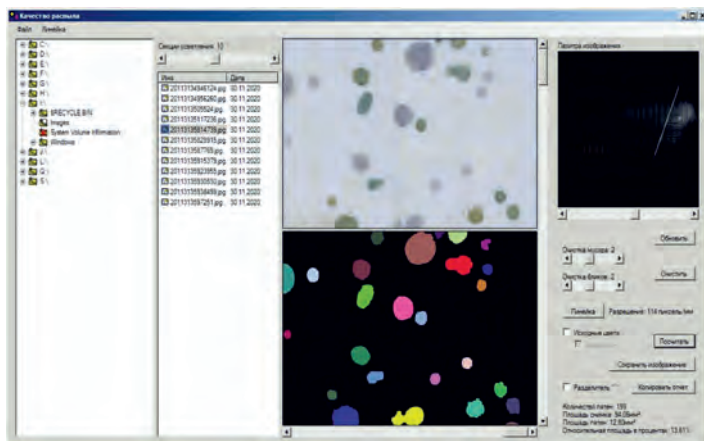


Рис. 90. Просчитанное изображение карточки

По результатам измерения, приведенным в правом нижнем углу окна, определяют число пятен, общую площадь обработанной поверхности, суммарную и относительную площадь пятен.

По команде «сохранить» эти данные перебрасываются в таблицу Excel, где накапливаются для итогового расчета (рис. 91).

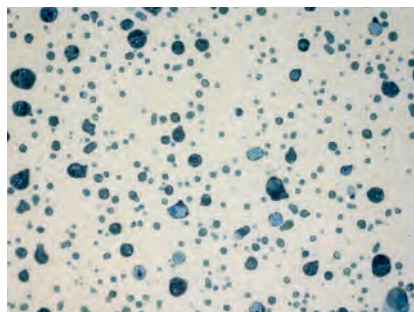
№	Количество	Общ. площадь, мм²	Площадь, мм²	Отн. Площадь, %
1	95	94.06	4.43	4.71
2	77	94.06	3.53	3.75
3	108	94.06	6.05	6.43
4	100	94.06	2.88	3.06
5	201	94.06	12.26	13.03
6	230	94.06	12.43	13.21
7	231	94.06	13.63	14.49
8	108	47.52	5.79	12.18
9	103	47.52	6.81	14.34
10	85	47.52	4.87	10.25
11	100	47.52	5.08	10.68
12	98	47.52	5.4	11.35

Рис. 91. Итоговая расчетная таблица

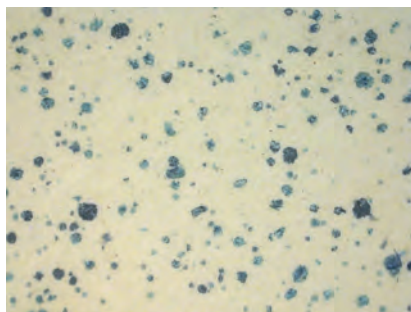
Методы экспресс-тестирования спектра капель на поле орошения в аэрозольной камере

Эксперименты по определению качественных характеристик спектра капель методом экспресс-тестирования проводились в аэрозольной камере. Карточки выкладывались на пробоотборники в зонах 0-3. Время экспозиции равнялось ~ 1 с. Карточки выдерживались в камере 20 мин до полного осаждения на них капель. При этом испаряемость капель была минимальна благодаря растворенному в них неорганическому соединению, понижающему упругость пара над каплей. Следует также учесть, что влажность в аэрозольной камере после впуска в камеру аэрозоля повышается, что также замедляет процесс испарения.

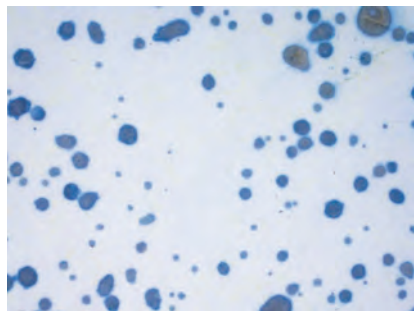
Цифровые изображения карточек приведены на рис. 92.



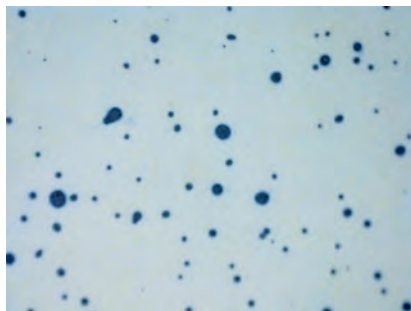
а



б



в



г

Рис. 92. Цифровые изображения карточки:
а – зона 0; *б* – зона 1; *в* – зона 2; *г* – зона 3

Естественно, что в качестве демонстрации представлена только одна фотография, площадь изображения которой 47 мм². В каждой зоне сделано по 19 таких изображений поверхности карточки.

В результате компьютерной обработки для каждой зоны получены усредненные по 10 фотографиям результаты, представленные в табл. 21.

Таблица 21

Результаты компьютерной обработки карточек по зонам

№	Число	Общая площадь	Площадь пятен	Относительная площадь, %
1	470	47	4,7	10,09
2	300	47	4,8	10,22
3	110	47	5,54	11,8
4	80	47	1,33	2,84

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на широкий спектр исследований процесса распыления жидкостей, имеет место дефицит достоверных количественных данных, на базе которых было бы возможным установить физические основы процесса диспергирования, механизма распыления, создать основы количественной оценки и теоретического анализа диспергирования жидкостей.

Отсутствие теоретического анализа, понимания физики диспергирования, технологии измерения дисперсных характеристик сдерживает процесс дальнейшего развития применения аэрозолей в промышленности, медицине и сельском хозяйстве, в результате чего применение аэрозолей всё ещё остается на уровне 60-х годов XX в.

Но создание такого научно-технического направления требует точного определения дисперсных характеристик капель распыла. Расчет и управление промышленными аэрозолями невозможны без знания количественных параметров спектра.

Анализ существующего состояния этой проблемы позволяет выделить основные факторы, влияние которых вносит существенную ошибку в определение количественных характеристик дисперсного состава капель распыла:

- деформация спектра генеральной совокупности в результате испарения капель;
- гравитационное разделение спектра капель по размерам за счет различной скорости седиментации;
- технология отбора пробы капель из факела;
- выбор теоретической функции, аппроксимирующей опытное распределение;
- неоднородность спектра капель в горизонтальном сечении факела.

Моделирование процесса гравитационного разделения капель по размерам позволило сделать вывод о его зависимости от множества причин, таких как испаряемость, влияние восходящих движений, коагуляция и др. Процесс гравитационного осаждения многозначен

и не может быть представлен как функция одного аргумента. Поэтому создать теоретическую модель, учитывающую все стороны этой многозначности, не представляется возможным, по крайней мере в рамках настоящей работы.

Для того чтобы отклонения, причиной которых может быть гравитационное осаждение капель, не влияли на точность измерения, был отработан такой порядок проведения эксперимента, при котором отбор пробы аэрозоля производится в условиях равной вероятности осаждения для частиц всех размеров.

Неоднородность спектра капель приводит к тому, что численные показатели, отображающие дисперсные свойства спектра капель, носят многозначный характер. Тогда выбор показателей, которые можно считать основными, и геометрическое место взятия пробы на поверхности орошения – вопрос, требующий специального решения.

Разработаны технологические приемы и методы экспериментального определения количественных характеристик спектра капель распыла для отдельного распылительного механизма. Обеспечена равная вероятность осаждения на коллектор всех капель, диспергированных за период экспозиции. При этом в эту выборку не входят капли, образовавшиеся до начала экспозиции или после ее завершения.

Время от начала работы распылителя до выхода его на режим, а также момент прекращения работы распылителя не должны входить в период экспозиции. Выполнение этого условия обеспечивает заслонка (отсекатель потока), регулирующая процесс поступления аэрозоля в камеру. В начале эксперимента заслонка перекрывает доступ аэрозоля в камеру. После выхода форсунки на режим заслонка отъезжает в сторону. Капли начинают свободно осаждаться на предметные стекла. Перемещением заслонки управляет пневмоцилиндр, который обеспечивает высокую скорость поступательного движения и точное позиционирование отсекающего потока аэрозоля.

В целом время экспозиции выбирается таким, чтобы даже мелкие капли успели осесть на коллектор.

В горизонтальном сечении факела распыла в рамках существующей неоднородности по концентрации и размерам капель обо-

значены геометрические места линий симметрии, вдоль которых должны выкладываться предметные стекла. Такой порядок взятия пробы позволяет получить количественные значения градиентов неоднородности спектра генеральной совокупности по размерам, концентрации и суммарной массе капель по всей поверхности орошения.

Оценены вероятность искажения спектра распыла в результате разбрызгивания капель жидкости при ударе о поверхность и влияние инициированных слабых восходящих движений на спектральные характеристики.

На основе проведенного анализа факторов, способных привести к количественным искажениям спектра капель распыла, разработан и изготовлен испытательный стенд, цель которого – обеспечить репрезентативный отбор пробы аэрозоля, свободный от всякого рода искажений, возникающих за счет:

- испарения капель;
- гравитационного разделения капель по размерам (скорости осаждения);
- инерционности распылительных механизмов;
- способа и времени экспозиции;
- вторичного разбрызгивания капель при ударе о стенки или потолок камеры.

Количество капель, необходимое для обеспечения репрезентативности выборки, – 600-1200 шт. Причем это количество необходимо набрать на каждой линии отбора пробы (16 коллекторов), т.е. в среднем нужно измерить около 16000 капель. Задача не просто сложная, а практически невыполнимая.

Чтобы облегчить задачу измерения размеров капель, создана компьютерная программа графической обработки фотографий массива восстановленных капель. В рамках этой программы производится распознавание капель на фотографии, установление их размеров, группировка в интервалы заданной ширины.

В ходе разработки программы была предложена следующая последовательность операций:

1. Открыть изображение линейки и определить цену деления шкалы в микронах.

2. Открыть файл с каплями и выделить обрабатываемый участок.

3. Распознать капли измерить их размеры.

Команды 2 и 3 повторяются до тех пор, пока не будет измерено количество капель, обеспечивающее репрезентативность выборки. Всего на каждом участке поверхности орошения делается 12-14 фотографий. Суммарное количество фотографий, полученных со всей поверхности орошения, – около 200.

Обработка одной фотографии, содержащей 50-70 капель, занимает 6-8 с. После обработки требуемого количества изображений полученные при проведении эксперимента данные переносятся в электронную таблицу, которая осуществляет количественный расчет параметров распределения. Общее время обработки материалов, полученных на одном участке поверхности орошения, составляет 5-7 мин. В эту цифру входит не только время компьютерной обработки, но и время смены обрабатываемых участков. Время обработки всех 16 коллекторов не превышает 2 ч.

Результаты расчетов вносятся в итоговую таблицу, а также представляются в графическом виде.

Проведены пробные эксперименты по сравнительному измерению параметров спектра распыла капель для двух форсунок. Форсунки промышленного образца, изготовлены компанией Лехлер. Расходные характеристики форсунок: оранжевая – 0,39 л/с, зеленая – 0,59 л/с.

В результате проведенных испытаний выявлены предполагаемые различия в численной концентрации капель и совпадение (в пределах ошибки) размерных характеристик.

В целом проведенные опыты продемонстрировали соответствующие профессиональные возможности экспериментального комплекса при проведении сравнительных испытаний распылительных устройств. Создание на базе экспериментального комплекса технологии экспериментального тестирования распылительных устройств позволит выявить и научно обосновать «теоретические закономерности, правила, методы расчета и управления промышленными аэрозолями».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грин Г., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. – Л.: Химия, 1969. – 427 с.
2. Веретенников Ю.М., Долженко В.И., Горбачев И.В., Соколов М.С., Спиридонов Ю.Я., Санин С.С., Овсянкина А.В., Шогенов Ю.Х., Ладан С.С., Селиванов В.Г., Марченко Л.А., Ягодкин В.И., Островский В.Г., Паремский И.Я. Монодисперсные техногенные аэрозоли: матер. к симпозиуму по научно-технической проблеме «Создание и внедрение монодисперсных технологий сжигания жидких углеводородов и внесения пестицидов взамен полидисперсных», Московская область, Большие Вяземы, 5 сентября 2013 г.
3. Веретенников Ю.М., Паремский И.Я., Овсянкина А.В. Новое научно-техническое направление в физике ДЖС // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 8.
4. Никитин Н.В., Спиридонов Ю.Я., Соколов М.С. и др. Использование современных опрыскивателей в адаптивной защите растений // Агрохимия. – 2008. – № 11. – С. 51-59.
5. Маркевич А.Е., Немировец Ю.Н. Основы эффективного применения пестицидов. – Горки: учредж. образов. «Могилевский гос. учеб. центр подготовки, повышения квалификации, переподготовки кадров, консультирования и аграрной реформы», 2004. – 60 с.
6. Дунский В.Ф., Никитин Н.В., Соколов М.С. Пестицидные аэрозоли. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
7. Никитин Н.В., Спиридонов Ю.Я., Шестаков В.Г. Научно-практические аспекты технологии применения современных гербицидов в растениеводстве. – М.: Россельхозакадемия. ВНИИФ, 2010. – 189 с.
8. Павлюшин В.А., Лысов А.К., Веретенников Ю.М., Монастырский О.А. Агротехнологии внесения пестицидов // Информационный бюл. МСХ РФ. – 2004. – № 2. – С. 44-48.
9. Пажо Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984.
10. Spraying Systems Co. Распылительные форсунки для воды и других жидкостей. [Электронный ресурс]. – ssco_cat70m-ru_a.pdf
11. Маркевич А.Е., Немировец Ю.Н. Основы эффективного применения пестицидов: справ. – ООО «Ремком», 2004. – 60 с.
12. А. с. СССР 9 103388, кл. G 01 N 15/00, 1962. Способ определения размеров капель при распыливании жидкости. В.С. Фарбер, Г.Е. Церуашвили, Г.Ф. Квашали.
13. Братута Э.Г. Диагностика капельных потоков при внешних воздействиях. – Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 144 с.
14. Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И., Архипов В.А. Измерение дисперсности капель в факеле распыла форсунок методом «солевого остатка» // Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск.

15. **Братута Э.Г. Переселков А.Р.** К вопросу о новом методе измерения размеров капель // Энергетическое машиностроение. – № 18. – 1974. – С. 130-136.

16. Способ определения дисперсного состава капель струи распыленной жидкости / Евстигнеев В.В., Еськов А.В., Свистула А.Е., Черепов О.Д., Ключков А.В.; пат. РФ № 2277442 МПК В05В 12/08; опубли. в БИМП № 16, 2006.

17. **Евстигнеев В.В., Еськов А.В.** Комплекс оптического контроля дисперсного состава струи распыленной жидкости. // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2007. – № 3. – С. 13-21.

18. **Архипов В.А., Бондарчук С.С., Евсеев М.Я., Жарова И.К., Жуков А.С., Змановский С.В., Козлов Е.А., Коноваленко А.И., Трофимов В.Ф.** Экспериментальное исследование диспергирования жидкости эжекционными форсунками. // Инженерно-физический журнал. Т. 86. – № 6. – 2013. – С. 1229-1236.

19. **Архипов В.А., Бондарчук С.С., Жуков А.С., Змановский С.В., Трофимов В.Ф.** Исследование дисперсности распыливаемых капель жидкости методом малоуглового рассеяния. // Вестн. ТГПУ (TSPU Bulletin). – 2012. – 7 (122). – С. 15-18.

20. **А. с. SU 1562777 СССР, 1990.** Способ определения размеров капель. Э.Г. Хачатурян, В.С. Фарбер, Л.Б. Зибзибадзе, Г.Е. Церуашвили, Г.Ф. Квашали.

21. **А. с. SU 1617323 СССР, 1990.** Способ определения размеров капель. Э.Г. Хачатурян, Л.Б. Зибзибадзе, Г.Е. Церуашвили, В.С. Фарбер.

22. **А. с. SU 1539598 СССР, 1989.** Способ определения размеров капель. Э.Г. Хачатурян, Г.Е. Церуашвили, Л.Б. Зибзибадзе, Фарбер В.С.

23. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование и разработка технологии с техническими средствами контроля качества работы распылителей машин для химической защиты растений на базе инновационного метода восстановления первоначальных размеров капель распыла». – М.: «Росинформротех», 2019.

24. Effect of nozzle type on the spray performance of plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) Gong, C., Ma, Y., Yang, R., (...), Wang, X., Liu, Y. 2020 Scientia Agricultura Sinica.

25. **Веретенников Ю.М., Островский В.Г., Антонюк П.Н., Паремский И.Я., Овсянкина А.В.** Система СИ: система единиц измерений дисперсности // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2012. – № 2. – С. 27-29.

26. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольского. – М.-Л.: Химия, 1965. – Т. 3: Химическое равновесие и кинетика, свойства растворов, электролитные процессы. – 1005 с.

27. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольского. – М.-Л.: Химия, 1965. – Т. 1: Общие сведения, строение вещества, свойства важнейших веществ, лабораторная техника. – 1008 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава I. Существующие технические средства и технологии оценки качества химических защитных мероприятий	7
Глава II. Геометрия поля орошения	10
Глава III. Испаряемость капель распыла	20
Глава IV. Гравитационное разделение капель по размерам.....	24
Глава V. Метод восстановления первоначальных размеров капель	28
Глава VI. Оптико-электронная регистрации количественных параметров восстановленных капель	35
Глава VII. Экспериментальное исследование процесса восстановления первоначальных размеров капель	40
Глава VIII. Разработка конструкции аэрозольной камеры для лабораторных испытаний распылительных устройств	46
Глава IX. Техника и технология проведения эксперимента.....	59
Глава X. Математическая обработка экспериментальных данных.....	72
Глава XI. Компьютерная программа измерения размеров и концентрации капель распыла	78
Глава XII. Сравнительные испытания дисперсных характеристик однотипных форсунок.....	89
Глава XIII. Методика экспресс-тестирования дисперсных характеристик капель распыла.....	100
Заключение	113
Список использованных источников	117

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПЫЛИТЕЛЕЙ МАШИН ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

Научное издание

Редакторы: *Л.Т. Мехрадзе, В.И. Сидорова*

Обложка художника *П.В. Жукова*

Компьютерная верстка *Т.С. Ларёвой*

Корректоры: *В.А. Белова, С.И. Ермакова*

fgnu@rosinformagrotech.ru

Подписано в печать 27.09.2021	Формат 60×84/16	
Бумага офсетная	Гарнитура шрифта «Times New Roman»	Печать офсетная
Печ. л. 7,5	Тираж 500 экз.	Изд. заказ 418 Тип. заказ 683

Отпечатано в типографии ФГБНУ «Росинформагротех»,
141261, пос. Правдинский Московской обл., ул. Лесная, 60

ISBN 978-5-7367-1651-7



ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ МИНСЕЛЬХОЗА РОССИИ

В Информационном бюллетене Министерства сельского хозяйства России узнаете:

- о проведении аграрной политики страны;
- о мерах государственной поддержки аграриев;
- о развитии аграрного производства в регионах;
- о новых агротехнологиях и достижениях науки и техники;
- о новом в жизни сельских территорий.

В приложении – документы Правительства России и Минсельхоза России.

Подписку можно оформить через редакцию.

Стоимость подписки на 2021 г. с учетом доставки по Российской Федерации – 5289,24 руб. с учетом НДС (10%); за полугодие – 2644,62 руб. с учетом НДС (10%)

Телефоны для справок:

8 (496) 531-19-92,

(495) 993-55-83,

(495) 993-44-04.

e-mail: market-fgnu@mail.ru



