

С. А. Вамболь

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ,
КОТОРЫЕ ИСПОЛЬЗУЮТ МНОГОФАЗНЫЕ ДИСПЕРСНЫЕ СТРУКТУРЫ

2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»

С. А. Вамболь

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ,
КОТОРЫЕ ИСПОЛЬЗУЮТ МНОГОФАЗНЫЕ ДИСПЕРСНЫЕ СТРУКТУРЫ**

Харьков «ХАИ» 2013

УДК 504.3 : 504.06
В16

Розглянуто актуальну науково-прикладну проблему створення систем управління екологічною безпекою в умовах дії природних і техногенних факторів небезпеки різного генезису. Ці системи використовують багатофазні дисперсні структури для таких процесів, як оброблення сипких матеріалів, які пилять, видобуток вугілля в шахтних гірничих виробітках, ліквідація степових, низових і верхових лісових пожеж. Матеріал, викладений у монографії, становить науковий інтерес при аналізі, розробленні й оцінюванні ефективності заходів щодо забезпечення екологічної безпеки.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, аспірантів і студентів, які навчаються за екологічними напрямками

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. А. М. Касимов,
д-р техн. наук, проф. В. А. Андронов

Утверждено на заседании ученого совета университета
в качестве монографии (протокол № 5 от 29 ноября 2012 года)

Вамболь, С. А.

В16 Системы управления экологической безопасностью, которые используют многофазные дисперсные структуры [Текст] : монография / С. А. Вамболь – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2013. – 204 с.

ISBN

Рассмотрена актуальная научно-прикладная проблема создания систем управления экологической безопасностью в условиях действия природных и техногенных факторов опасности различного генезиса. Эти системы используют многофазные дисперсные структуры для таких процессов, как обработка сыпучих пылящих материалов, добыча угля в шахтных горных выработках, ликвидация степных, низовых и верховых лесных пожаров. Материал, изложенный в монографии, представляет научный интерес при анализе, разработке и оценке эффективности мероприятий по обеспечению экологической безопасности.

Для научных и инженерно-технических сотрудников, аспирантов и студентов, которые обучаются по экологическим направлениям.

Ил. 105. Табл. 12. Библиогр.: 330 назв.

УДК 504.3 : 504.06

ISBN

© Вамболь С.А., 2013
© Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 2013

ВВЕДЕНИЕ

Анализируя современное состояние экологической ситуации в Украине, следует отметить тенденцию к ее ухудшению. За последние 20 лет при увеличении числа вредных производств количество мероприятий, обеспечивающих экологическую безопасность населения и территорий, недостаточно. Рассматривая целесообразность применения дорогостоящих очистительных и восстановительных экологических систем, в первую очередь учитывают повышение себестоимости продукции. Поэтому создание систем управления экологической безопасностью на основе многофазных дисперсных структур перспективно с точки зрения энергетических и ресурсных затрат.

Под термином «многофазные дисперсные структуры» мы понимаем пространственные структуры, созданные с помощью технических средств мелкодисперсными взвешенными частицами воды или технической жидкости, которые берегут созданную форму структуры на протяжении заданного времени.

Одним из основных факторов формирования экологической и техногенной опасности является пыль, при некоторых видах производств (горные шахтные выработки) – с наличием взрывоопасных компонентов. При проведении технологических процессов достаточно большое количество пыли поступает в воздух. Погрузка и разгрузка пылящих сыпучих материалов, разрушение горных пород, карьерные выработки – при этих работах в воздух поступает значительное количество мелкодисперсных (взвешенных) частиц диаметром 2...10 мкм, которые вызывают негативные изменения в геосфере и приводят к заболеваниям человека.

Технологические процессы обработки сыпучих материалов предусматривают мероприятия по снижению экологической нагрузки на природную среду орошением источников возникновения пыли различными технологическими жидкостями или водой. Несмотря на многочисленные исследования процесса обеспыливания, проведенные до настоящего времени, методы и средства пылеподавления, применяемые в вышеназванных производствах Украины, являются малоэффективными. Особенно характерно это при реализации технологических процессов, когда площадь источников пылевыделения имеет размеры сотни квадратных метров, а объемы запыленного воздуха – тысячи кубических метров. Эффективный метод борьбы со взвешенными частицами пыли в этом случае – это мелкодисперсное орошение, при котором происходит улавливание и осаждение взвешенных частиц пыли каплями технологической жидкости или воды. Капли генерируются и транспортируются в зону пылеобразования той или иной системой диспергирования.

Решение задачи с уменьшением пылеобразования в горных шахтных выработках не только позволяет улучшить экологическую безопасность, но и снижает риск возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного

характера. Специфика производства часто определяет достаточно быстрое образование взрывоопасных смесей угольной пыли, метана и других компонентов. В условиях замкнутого пространства одним из эффективных средств борьбы с образованием таких смесей может являться создание мелкодисперсных структур технологических жидкостей, покрывающих производственную зону. Мелкодисперсная структура улавливает и осаждает угольные компоненты пыли, снижает температуру в рабочей зоне.

Возможность применения систем управления экологической безопасностью, которые используют многофазные мелкодисперсные структуры, необходимо рассматривать и в случаях ликвидации лесных и степных пожаров. Применение мелкодисперсных заградительных завес в комплексе со взрывом шлангового заряда может стать эффективным методом ликвидации степных и низовых лесных пожаров. При этом для снижения температуры и давления в области горения и распространения пожара можно существенно сократить объемы технологической жидкости.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что проблема создания систем управления экологической безопасностью, которые используют многофазные дисперсные структуры для таких процессов, как обработка пылящих сыпучих материалов, добыча угля в шахтных горных выработках, при ликвидации низовых лесных и степных пожаров, является актуальной.

1. АНАЛИЗ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ, ПРИ РЕШЕНИИ КОТОРЫХ МОГУТ ИСПОЛЬЗОВАТЬСЯ МНОГОФАЗНЫЕ ДИСПЕРСНЫЕ СТРУКТУРЫ

1.1. Развитие концептуальных основ управления экологической безопасностью

Исследование различных аспектов экологической безопасности требует конкретизации сущности понятийного аппарата, методологии решения экологических проблем. Управление экологической безопасностью является составной частью системы управления, которая связана с комплексом проблем жизнеобеспечения человека. Вопросы по этой проблематике конкретизируют и детализируют научные труды А.И. Данилова, А.Д. Липенкова, И.В. Масленниковой, В.Я. Шевчука, Ю.М. Саталкина, В.М. Навроцкого, В.Н. Федосеева и других ученых. В последнее время выполняются многоаспектные теоретические и практические исследования по данной отрасли. В работах М.М. Быченка, М.В. Маслова, В.М. Шмандия, А.М. Касимова, Г.Д. Коваленко, С.С. Рыжова, Л.Д. Пляцука, М.С. Малеваного, В.Н. Кобрина, Н.В. Нечипорука, Т.Ф. Жуковского, О.М. Бугаенко, Н.В. Кобриной и других конкретизируются и углубляются подходы по различным научным направлениям, в частности по техническим.

Постоянно расширяется сфера теоретических и практических исследований. При этом экологическая безопасность рассматривается как составляющая национальной безопасности [26, 27, 28].

Учитывая существенное влияние различных катастроф на жизненные условия общества, теоретические и практические исследования изначально были посвящены управлению при чрезвычайных ситуациях. В основе этого подхода применительно к экологической безопасности лежит принцип оптимального распределения ресурсов оперативного реагирования между совокупностью источников потенциальной опасности, который позволяет эффективно их использовать в случае угрозы и возникновения чрезвычайных ситуаций. Указанный подход применяется при действии случайных факторов составляющих безопасности и получил название «логиковароятностная концепция» [24, 34, 37]. Однако, поскольку катастрофические ситуации «характеризуются глубокими и необратимыми изменениями природы, потерей природных ресурсов и резким ухудшением условий проживания населения» [28, с. 66], управление экологической безопасностью в таких условиях в форме мероприятий по преодолению их последствий имеет характерные особенности организационного, ресурсного, социального и психологического плана.

Необходимо отметить, что чрезвычайные ситуации имеют вероятностный характер проявления, а изменения в окружающей среде могут носить критический, напряженный, удовлетворительный и условно благоприятный характер [104]. Кроме того, в таких экологических ситуациях постоянно присутствует техногенная и природно-антропогенная нагрузка, которая не носит явно выраженного экстремального характера. Поэтому управление безопасностью в таких условиях требует специальных систем и методов, которые адекватны ситуациям с учетом региональных аспектов безопасности.

Следует сказать о проблемах экологизации производства [16, с. 240], которые отражают степень соответствия всех элементов производства (средств и предметов труда) требованиям рационального природопользования и ресурсосбережения, а также возможности гарантировать экологическую безопасность окружающей среды.

Под системой управления понимается множество закономерно взаимосвязанных элементов управления (целей, структуры, задач, технологий, персонала), объединенных в единый механизм, способный достигать поставленных целей, принимать скоординированные эффективные решения [223, с. 75 – 77]. Выделены и реализуются три инструмента: иерархия организации – действия при подчинении, принуждении различными видами средств, что определено системой принятия и реализации решений в системе; организационная культура - вырабатываемые и признаваемые общностью ценности, нормы, установки, шаблоны поведения; рыночный механизм – система обеспечения равных прав и возможностей в отношении элементов социально-экономических процессов [75, с. 14, 83].

Необходимо обратить внимание на понятийно-терминологический аппарат управления экологической безопасностью. Так, в работе [28] используется понятие «управление экологическими ситуациями», которое трактует его как «...система действий, направленных на достижение определенного уровня качества окружающей среды, который обеспечил бы нормальное функционирование геосистемы, ее средо- и ресурсовоспроизводящие свойства, здоровую среду обитания для человека, успешное функционирование социальной сферы и экономики, обеспечивающих материальные и духовные потребности людей». В этом отношении требует конкретизации термин «успешное функционирование».

В работе [159] предлагаются следующие пути управления экологической безопасностью: организация такой хозяйственной деятельности, которая обеспечила бы рациональное природопользование и оптимальный (нормативный) режим функционирования природных систем; активное воздействие на природную среду, перевод ее из одного состояния в другое. По первому направлению рассматривается совокупность мероприятий, регламентирующих преимущественно действия в периоды неблагоприятных метеословий. Второй путь требует специальных научных обоснований, подготовки, значительных расходов на его осуществление по каждому из направлений возникновения опасности. В работе [28] отмечается, что организационные меры должны осуществляться государственными органами управления различного уровня, государственными и частными предприятиями, однако суть этих мероприятий не раскрыта.

В Центре по изучению производительных сил Украины НАНУ [79] развивается системно-динамическая концепция управления техногенно-экологической безопасностью, делается акцент на решение комплексной задачи: исследование в системе ситуаций, обуславливающих техногенно-экологическую опасность и ее характер; возможность реализации такого состояния системы, когда степень безопасности поддерживается на необходимом уровне. При этом техногенно-экологическая безопасность рассматривается авторами как элемент интегрированной безопасности, которая включает также социально-экономическую составляющую, а процесс управления безопасностью должен учитывать:

- группу источников опасности, состоящую из трех блоков: «геоэкологическая подсистема», «техноэкологическая подсистема», «первая природа»;

- группу управления безопасностью, объединяющую «блок социально-экологической системы», «блок определения целесообразности уровня интегрированной безопасности», «блок достижения оптимального уровня интегрированной безопасности посредством реализации ресурсно-экономических возможностей эколого-экономической системы».

Авторами работы [79] сделан акцент на экономических методах управления. Для решения важной задачи оценки состояния эколого-экономической системы введены шесть индексов (потенциалов), каждый

из которых связан с собственными ресурсами его обеспечения. Техногенно-экологическую безопасность характеризует один из них. Близкий научный подход присутствует в работе [278], где обосновывается необходимость всестороннего исследования условий формирования и проявления опасности для эффективного управления экологической безопасностью.

Некоторые исследователи анализируют управление экологической безопасностью с позиций обеспечения минимизации возможного ущерба от загрязнения природной среды и воздействия на здоровье человека. В работе [159] разработаны математические формализованные модели управления техногенными воздействиями, основанные на социально-экономических подходах, однако рассмотрен лишь один вид техногенной опасности - радиационный. Общим недостатком приведенных подходов является отсутствие всесторонних разработок аспектов регионального управления экологической безопасностью.

Важным элементом служит система основных принципов обеспечения экологической безопасности. В.И. Измалков [90] выделяет следующие положения:

- комплекс организационно-технических, социально-экономических и других мероприятий должен быть адекватен антропогенным воздействиям, приводящим к отклонению от допустимых значений параметров, характеризующих экологическую обстановку;

- экологическое обеспечение необходимо рассматривать с конкретной привязкой к функционированию объектов, формирующих опасность;

- целесообразность достижения минимально возможных уровней риска антропогенного воздействия на объекты биосферы и происходящие в ней негативные изменения не превышают научно допустимых их значений;

- универсальность организации управления экологическим обеспечением и преемственность организационных форм и методов экомониторинга в условиях нормального функционирования источников антропогенного воздействия и в аварийных ситуациях;

- взаимодействие и организационная взаимосвязь всех государственных, ведомственных и территориальных структур, выполняющих функции экологического обеспечения;

- гибкость организационных форм, допускающая сосредоточение усилий на тех или иных проблемах обеспечения экологической безопасности.

Указанные положения не противоречат принципам управления в целом и управлению экологической безопасностью в частности, хотя изложенные тезисы требуют конкретизации.

Авторы работы [270] считают обеспечение гармонизации отношений общества и природы идеалом, который может реализоваться «... если люди будут управлять не природой, а прежде всего собой, своими «ресурсными аппетитами», своим экологическим самосознанием и культу-

рой». Исходя из необходимости достижения указанного идеала, авторы предлагают соблюдать такие требования: принципы и методология управления экологической безопасностью должны быть адекватны задекларированным на глобальном и национальном уровнях руководящим принципам гармонизации жизнедеятельности общества и сбалансированного развития; внедрение и развитие управления экологической безопасностью должно основываться на экологических законах, принципах и методологии системного подхода; для обеспечения методологической тождественности в подходах управление должно базироваться на системе международных регламентов и стандартов; развитие системного управления должно основываться на гуманитарных принципах и приоритетах национальной экологической политики; функции управления должны корреспондироваться с общесистемными функциями административного управления; управлению необходимо основываться на собственной законодательной и нормативно-правовой базе, которая должна занимать доминирующее место в системе влияния на развитие общества; эффективность управления обеспечивается профессионально подготовленным управленческим персоналом; управление должно иметь в своем распоряжении собственную информационную систему, которая обеспечивает мониторинг реализации принятых решений [270, с. 29].

Указанные принципы управления, по нашему мнению, являются приемлемыми, хотя они не в полной мере охватывают инновационные и технологические аспекты обеспечения жизнедеятельности в условиях динамичных процессов научно-технического прогресса, требуется их конкретизация на региональном уровне с учетом различной специализации территории.

Для определения сущности управления экологической безопасностью важным является структурирование уровней воздействия. Авторы работы [285] выделили следующие уровни экологической безопасности: объекты безопасности, их жизненно важные интересы; угрозы жизненно важным интересам; основные направления государственной политики по обеспечению безопасности в экологической сфере как часть единой государственной политики по обеспечению устойчивого развития страны; система неотложных мер правового, организационно-управленческого, эколого-экономического, научно-методологического, инженерно-технического, воспитательного и иного характера, направленных на нейтрализацию угроз жизненно важным интересам объектов; система обеспечения безопасности; комплекс мер противодействия угрозам. По результатам анализа изложенного подхода можно отметить, что следует все-таки разделять цели (объекты и угрозы) и инструменты их достижения (меры, политика, системы обеспечения).

Некоторые исследователи, в частности авторы работы [294, с. 168], рассматривают управление экологической безопасностью так «...діяльність державних органів і економічних суб'єктів головним чином

спрямована на дотримання обов'язкових вимог природоохоронного законодавства, а також на розробку і реалізацію відповідних цілей, проектів і програм». Управление экологической безопасностью отождествляют [295, с. 14] с системой управления природоохранной деятельностью «...как комплексом взаимосвязанных организаций, методов и мероприятий, позволяющим оценить состояние, структуру, изменения окружающей среды и входящих в ее состав ресурсов вследствие целенаправленной деятельности человека при производстве материальных благ и предпринять адекватные действия по их устойчивому развитию в целях решения поставленных задач национальной экономики».

Управление экологической безопасностью в последнее время связывают с системой экологических рисков. При этом рассматривают методологию управления экологическими ситуациями, основанную на количественной оценке техногенных воздействий. В работе [28] выделены техногенные, природные, военные, социально-экономические, политические и террористические факторы риска экологической опасности и классифицированы риски экологической природы в различных аспектах, включая литогеохимические, гидрогеологические, инженерно-геодинамические составляющие (не противоречит мнению авторов [16, 50]). В работе [16] обосновывается важность учета экологического риска, однако не приводится его количественная оценка. Авторы работы [159] выделяют виды рисков, которые можно использовать в качестве критериев безопасности: максимально допустимый экологический риск, который не должен превышать независимо от экономического или социального вида деятельности; приемлемый экологический риск, т.е. область, в пределах которой производится поиск оптимальных экономических решений, обеспечивающих безопасность; пренебрежимый экологический риск, который составляет 1 % от максимально допустимого риска.

Некоторые исследователи считают, что оценка эффективности управления экологической безопасностью должна стать обязательным элементом при принятии решений по стимулированию экономической деятельности предприятия [285]. При оценке инвестиционной привлекательности в качестве количественной меры ее экологической составляющей предлагается рассматривать величину отклонения реального значения опасности (риска) предприятия от приемлемого уровня риска.

Приведенный выше анализ развития научных представлений относительно управления экологической безопасностью позволяет сделать следующие выводы:

- имеются положительные тенденции в развитии данного научного направления;

- существует терминологическое многообразие: используются такие термины, как «экологическое управление», «управление технико-экологической безопасностью», «управление в чрезвычайных ситуациях», «экологический менеджмент» и другие;

– мероприятия по управлению экологической безопасностью в большинстве случаев имеют общепостановочный характер и требуют конкретизации;

– рассматриваются методики оценки в основном отдельных видов экологической опасности;

– практическое применение предлагаемых моделей и систем ограничено несовершенством информационной базы при определении предлагаемых показателей, индексов, характеристик состояния анализируемых экосистем;

– в научных разработках широко представлены экономические методы управления, но в меньшей степени обоснованы меры технического обеспечения управленческих решений.

Решению задач управления экологической безопасностью с рассмотрением технологического обеспечения управленческих решений и посвящена данная монография.

1.2. Состояние проблемы создания системы управления экологической безопасностью экономичными и высокопроизводительными методами при возникновении лесных и степных пожаров

Начнем рассмотрение технического обеспечения управленческих решений из проведенных исследований борьбы с лесными и степными пожарами.

Одним из способов локализации лесных пожаров является создание минерализованных полос с помощью взрыва. Данный способ относительно прост в применении, имеет малую стоимость и высокую эффективность. Его целесообразно использовать в случае большого удаления очага пожара от источников воды на труднодоступных для техники участках местности и каменистых грунтах. Вместе с тем этот способ обладает недостатками, которые приводят к ограничению его широкого применения. В первую очередь высокий риск вызывает применение взрывчатых веществ. Использование в качестве источника взрыва конденсированных взрывчатых веществ, как правило, приводит к загрязнению окружающей среды.

Наличие преимуществ во взрывном способе создания минерализованных полос с помощью топливовоздушных зарядов послужило причиной его использования в технике локализации лесных пожаров, рассматриваемой в данной работе. Учитывая, что с возрастанием ширины минерализованной полосы происходит возрастание ее эффективности, требуется решить задачу об оптимальном распределении зарядов для создания сплошных широких полос.

Способ локализации лесных пожаров созданием минерализованных полос с помощью взрыва рассматривался в работах [203, 70, 337]. Часть недостатков данного способа устраняется применением зарядов объем-

ного взрыва. Так, давление во фронте детонационной волны в топливовоздушных смесях на порядки меньше давления, возникающего в конденсированных взрывчатых веществах. В результате вероятность выворачивания деревьев или обрыва крупных веток резко снижается. Использование углеводородных топлив минимизирует воздействие на экологическую систему. Кроме того, при одинаковой энергии взрыва импульс давления, создаваемый зарядом объемного взрыва, превосходит импульс от взрыва конденсированных веществ [162], то есть коэффициент полезного действия по созданию противопожарной преграды в зарядах объемного взрыва возрастает.

Вместе с тем остается множество вопросов, связанных с практической реализацией данного способа. Предложенный А.М. Гришиным и другими вариант формирования топливовоздушной смеси с помощью разрывного заряда, первоначально примененный в боеприпасах объемного взрыва, не снижает риска во время эксплуатации таких зарядов. В случае взрывного распыления топлива основная масса детонационноспособной смеси распределяется по периферии облака, что приводит к снижению ударного действия с соответствующим повышением расхода топлива.

Несмотря на высокий уровень развития техники пожаротушения, до настоящего времени существует проблема в создании средств, позволяющих автономно, с высокой производительностью и малыми затратами осуществлять тушение крупных лесных пожаров. Поэтому периодически возникающие крупные лесные пожары продолжают наносить большие потери и остаются источником возникновения пожаров других типов.

Тушение пожара на больших площадях в условиях изменения направления ветра требует перераспределения сил и средств, что достижимо только при наличии мобильных средств доставки и тушения. Требованиям автономности и мобильности удовлетворяют средства локализации и тушения взрывом, размещенные на транспортных машинах. Это делает их особенно привлекательными для решения задачи тушения крупных лесных пожаров в случае значительного удаления очагов пожара от источников воды. Применение способа локализации пожаров взрывом требует оценки его эффективности, определяемой параметрами заряда. Оценку эффективности можно проводить путем математического моделирования области обрыва лесогорючих материалов (ЛГМ), формируемой при взрыве топливовоздушных зарядов в лесном фитоценозе.

В работах А.М. Гришина [70, 199] разработана концепция борьбы с лесными пожарами путем относительно малых энергетических воздействий. Автор отмечает, что в какой-то мере данные требования противоречат друг другу. И поэтому не существует универсального способа борьбы с различными типами лесных пожаров. К новым эффективным способам, частично удовлетворяющим разработанной концепции, А.М. Гришин отнес способы локализации и тушения лесных пожаров с помощью взрывных и ударных волн. Результаты теоретических и эксперименталь-

ных исследований, представленные в работе [199], дают оценку эффективности воздействия ударных волн на растительность и фронт лесного пожара применительно к взрывам шланговых зарядов конденсированных взрывчатых веществ (заряды ЭШ-1П и ПЖВ-20). Полученные результаты подтвердили эффективность взрывного способа, позволяющего с высокой производительностью, простотой, относительно малой стоимостью решать задачи локализации и тушения лесных пожаров. Преимущества данного способа также заключаются в возможности его применения на большом удалении от источников воды. В случае расположения шланговых зарядов на удалении от стволов деревьев происходит обрыв только тонких веточек и хвоинок. Но при контактном взрыве заряда наблюдаются выворачивание деревьев и обрыв крупных веток, что приводит к снижению эффективности способа.

Дальнейшее развитие взрывного способа локализации и тушения лесных пожаров сделано в работах Г.В. Ревы [159, 203], А.Л. Подгорного и других, где решалась задача получения направленного взрыва за счет применения отражателей.

Качественно иная эффективность взрывного способа достигается в случае применения зарядов на основе топливовоздушных смесей. Экспериментальные исследования этого способа по тушению низовых лесных пожаров были проведены научными подразделениями Института танковых войск (К.В. Корытченко) и Национального университета гражданской защиты Украины (Д.П. Дубинин). Было установлено, что в результате взрыва происходит сдувание только тонких веточек, что позволяет природе быстро восстановить растительный массив после пожара, а также отсутствует загрязнение окружающей среды в случае применения распространенных топлив и специальной оболочки [162]. Дальнейшее теоретическое исследование воздействия ударной волны на лесной фитоценоз вблизи земной поверхности проводилось с привлечением специалистов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» [142].

Переход пожара из низовой стадии в верховую требует иной техники применения способа локализации взрывом и, соответственно, дополнительных исследований. Поэтому актуальной проблемой является решение задачи оптимизации размеров зарядов топливовоздушных смесей, количества, места их расположения в зависимости от размеров и плотности лесного фитоценоза в лесном массиве. В дальнейшем целесообразно рассмотреть подходы по моделированию области обрыва лесогорючих материалов, формируемой при взрыве топливовоздушных зарядов в лесном фитоценозе. Используя основы математического моделирования и существующие возможности вычислительной техники, возможно моделирование процессов управления экологической безопасностью.

Кроме того, если лесной и степной пожары подходят близко к техническим объектам или населенным пунктам, то для снижения воздействия

взрыва заряда необходимо применять завесы, например водяные или состоящие из дисперсных частиц технологической жидкости.

1.3. Состояние проблемы управления экологической безопасностью при проведении работ в угольных шахтах

Основными проблемами с точки зрения техногенно-экологической безопасности являются образование пыли при горной выработке и возникновение взрывов и пожаров на ее основе. Взрывы газа и угольной пыли относятся к авариям с наиболее тяжкими последствиями в социальном и экономическом плане. Взрыв метано-воздушной смеси и угольной пыли в шахте, сопровождающийся формированием и распространением по сети горных выработок ударных волн, – очень опасный вид подземной аварии. Угрожая жизни и здоровью горнорабочих, взрыв всегда приводит к разрушению выработок и повреждению расположенного в них горного оборудования. При этом социальные, материальные и финансовые потери могут достигать катастрофических размеров.

Для обеспечения безопасности условий труда рабочих на угольных шахтах необходимо эффективно производить гашение угольной пыли, так как пыль, находясь во взвешенном состоянии, в смеси с метаном образует взрывчатую систему. Гашение угольной пыли в воздухе забоя может осуществляться: предварительным нагнетанием воды в пласт для его увлажнения, орошением забоя водой с подачей ее, по возможности, непосредственно в места отбойки угля, а также дополнительно, путем создания заградительных завес. Таким образом, актуальной есть техническая проблема повышения эффективности способов гашения угольной пыли путем снижения энергетических затрат на создание заградительных завес в сети горных выработок.

Одним из наиболее эффективных методов предотвращения чрезвычайной ситуации является создание водяных завес для снижения концентрации угольной пыли. При расходе воды до 35 л на каждую тонну добываемого угля, давлении воды у оросителей до 10 – 15 атмосфер и рациональном расположении оросителей эффективность способов гашения пыли предварительным нагнетанием и орошением достигает 95 %.

Проекты новых и реконструируемых шахт (горизонтов), вскрытия и подготовки блоков, панелей, выемочных полей, а также паспорта выемочных участков, проведения и крепления подземных выработок должны содержать мероприятия по борьбе с пылью, выполняемые в соответствии с Инструкцией по комплексному обеспыливанию воздуха. Вновь создаваемые горные машины для отбойки и транспортирования горной массы должны обеспечивать минимальное пылеобразование. Горные машины, при работе которых образуется пыль, необходимо оснащать средствами пылеподавления, поставляемыми заводами-изготовителями комплектно с машинами.

1.3.1. Существующие методы пылеподавления

Все мероприятия по борьбе с пылью подразделяются на следующие группы: предупреждение и снижение пылеобразования (применение машин и оборудования с рабочим органом крупного скола, использование одновременно механического и гидравлического способов разрушения массивов); осаждение пыли, взвешенной в воздухе (орошение, применение пены); пылеотсос и осаждение пыли в специальных аппаратах; соответствующий режим вентиляции, включающий в себя эффективное снижение концентрации пыли и уменьшение выноса пыли из мест ее образования. Применение машин с рабочим органом крупного скола снижает пылеобразование на 30 – 40 %.

Разрушение массива струями воды высокого давления 25 – 30 МПа снижает выход мелких фракций до 40 %. При этом массовая концентрация пыли на расстоянии 6 м от места разрушения массива по ходу вентиляционной струи не превышает 5 мг/м³. На принципе гидромеханического разрушения массива создан комбайн КШ-3Г. Как показали исследования, при всех схемах разрушения с увеличением давления воды концентрация пыли снижалась и при давлении 30 МПа и составляла 7 – 15 мг/м³.

Одним из эффективных способов предупреждения пылеобразования при выемке угля является предварительное увлажнение массива угля. При нагнетании жидкости в массив увеличивается его влажность, что способствует росту адгезионно-когезионных сил между поверхностями образующихся при разрушении угля пылевидных частиц, образованию из них крупных агрегатов, быстро осаждающихся из воздуха под действием силы тяжести; снижается механическая прочность массива, что обуславливает уменьшение удельного расхода энергии на его разрушение; увеличивается смачиваемость тонкодисперсной пыли «скольжения» в трещинах угольного массива.

Широко распространенным способом осаждения пыли является орошение. Суть этого способа заключается в том, что при взаимодействии капли жидкости с частицей пыли происходят ее смачивание, захват каплей и осаждение получившегося агрегата на почву или стенки выработки. Это может происходить как в статических, так и динамических условиях. На практике гидрообеспыливание воздушных потоков в горных выработках осуществляется главным образом в динамических условиях.

Процесс смачивания пылинки происходит путем вытеснения воздуха (газа) с ее поверхности при растекании жидкости.

Для хорошо смачиваемой пыли (гидрофильной) захват пылинок осуществляется под действием незначительных сил молекулярного притяжения, сил соударения частиц с каплями, сил тяжести и др.

Для плохо смачиваемой пыли (гидрофобной) этих сил недостаточно, и потому необходимо увеличивать скорости движения капель за счет

увеличения давления жидкости в форсунках и снижения энергии поверхностного натяжения капель за счет применения ПАВ.

Орошение подразделяется на низконапорное, высоконапорное, пневмогидроорошение, гидроакустическое, туманообразование, водовоздушное эжектирование.

Низконапорное орошение осуществляют при давлениях жидкости до 2 МПа. При низконапорном орошении и пневмогидроорошении пыль смачивается в местах ее образования и осаждения из воздушного потока.

Применение водовоздушных эжекторов и туманообразователей обеспечивает эффективное осаждение пыли из воздушного потока. Технологические схемы орошения, используемые при работе проходческих и очистных комбайнов, включают в себя набор приборов регулирования и подачи воды непосредственно в места образования пыли, а также в систему трубопроводов и гибких шлангов.

При передвижке механизированных крепей образуется большое количество пыли. Для предотвращения поступления этой пыли в очистной забой применяют оросительные устройства. Воду подают вдоль межсекционных зазоров в сторону выработанного пространства. Расход воды составляет 10 л/мин при давлении 1 – 1,5 МПа.

На крепях оградительно-поддерживающего типа устанавливают оросительные устройства для подачи воды в межсекционное и выработанное пространство. Расход воды составляет 35 л/мин при давлении 1 – 1,5 МПа. При наличии энергии сжатого воздуха применяют пневмогидроорошение, сущность которого заключается в том, что при одновременной подаче в форсунку жидкости и сжатого воздуха происходит тонкое диспергирование жидкости. При этом необходимо, чтобы образовался факел тонкодиспергированной (размер капель 40 – 60 мкм) и грубодиспергированной (размер капель 100 – 200 мкм) жидкости. Чем более однороден по размерам капель каждый из этих факелов, тем выше эффективность пылеосаждения. Объемное отношение расхода жидкости и воздуха находится в пределах 80 – 30. Давление жидкости и воздуха в оросителе равно 0,4 – 0,5 МПа. Расход жидкости составляет 4 – 8 л/мин.

При высоконапорном орошении происходит тонкое диспергирование жидкости, за счет чего увеличивается число капель в единице объема воздуха, факел орошения становится более насыщенным каплями жидкости, повышается скорость полета капель, что способствует эффективному использованию инерционного и гравитационного пылеосаждения. Кроме того, в результате инъекции запыленного воздуха факелом диспергированной воды увеличиваются размеры очищаемой пыли и степень турбулизации потока воздуха у мест образования пыли.

Расход жидкости при высоконапорном орошении составляет 0,07 – 0,25 л на 1 м³ запыленного воздуха. Эффективность очистки воздуха от пыли при высоконапорном орошении – 90 – 97 %. Весьма важно, что при

этом повышается степень улавливания тонкодиспергированных частиц пыли размером менее 5 мкм.

В настоящее время ведутся большие работы по использованию электрических зарядов частиц пыли и наведенного заряда на каплю жидкости для повышения эффективности пылеулавливания. Как показали исследования, частицы пыли несут на себе заряды различных знаков. При этом напряженность электрического поля пылевого аэрозоля достигает 3 В/м. Эффективность пылеулавливания увеличивают, заряжая капли жидкости знаком, противоположным знаку заряда на пылинках.

Гидроакустическое орошение заключается в том, что на пылевой аэрозоль одновременно оказывают воздействие капли жидкости и акустические колебания, создаваемые струей жидкости при выходе из оросителя до ее распада. При этом можно подобрать такую частоту колебаний, что пыль в акустическом поле будет агрегироваться, а диспергированная жидкость – смачивать ее и осаждать. Гидроакустический способ рекомендуется для улавливания витающей пыли. Для эффективного пылеподавления необходимо выдерживать следующие параметры: давление воды у оросителя – 0,35 – 0,8 МПа, расход жидкости – 0,2 л на 1 м² орошаемого воздуха, частота колебаний – 3 – 4 кГц, удельная акустическая мощность – 20 – 25 Вт/м².

Для гидроакустического осаждения пыли применяется форсунка типа ФА, обеспечивающая эффективность пылеосаждения до 90 %.

Пневмогидравлические эжекторы используются для улавливания пыли при работе проходческих комбайнов. Суть пылеулавливания заключается в том, что выходящий из специального устройства воздух создает в определенной области разрежение, куда всасывается запыленный воздух; на последний воздействует тонкодиспергированная жидкость. Осажденная пыль в виде шлама удаляется. Эффективность пылеподавления такого способа достигает 95 – 99 % при давлении воды 0,8 – 1 МПа, давлении сжатого воздуха 0,3 – 0,4 МПа и расходе воды 0,5 – 3,5 л/мин.

Оборудование для орошения включает в себя насосные установки, забойные водопроводные магистрали, фильтры и оросители. В качестве насосных установок используют насосы, обеспечивающие давление 1,3 – 3,2 МПа с подачей 20 – 400 л/мин.

Одними из основных элементов оросительной системы являются оросители. Наибольшее распространение получили следующие оросители: зонтичные типа ОЗ, у которых факел жидкости имеет вид зонтика; конусные типа ОК, у которых факел имеет вид полого или сплошного конуса; плоскоструйные типа ОП, у которых факел имеет плоскую форму; тангенциальные типа ФТ, у которых жидкость поступает в камеру по тангенциальному каналу и при этом происходит закручивание факела.

Кроме того, разработан ряд водовоздушных эжекторов, которые применяются для пылеподавления в различных условиях. Основные типы водовоздушных эжекторов – цилиндрические ЭЦ и конусные ЭК. Для оро-

шения применяют воду, отвечающую требованиям ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая». При отсутствии питьевой воды допускается по согласованию с органами санитарного надзора применять воду, не содержащую вредных и трудноустраняемых примесей, при условии ее предварительной очистки.

Для осаждения взвешенной в воздухе пыли применяют также туман, создаваемый специальными установками – туманообразователями. Осаждение пыли происходит в результате конденсации паров воды на поверхности частиц пыли и соударения тончайших капелек с частицами пыли, их коагуляции и утяжеления. Эффективность пылеподавления туманообразователями достигает 90 % и выше при давлении воды 0,1 – 0,5 МПа и сжатого воздуха 0,3 – 0,6 МПа и расходах воды 3 – 40 л/мин и сжатого воздуха 0,3 – 3 м³/мин. Комплекс противопылевых мероприятий, основанный на применении жидкости, наряду с положительными сторонами имеет ряд недостатков. Так, гидрообеспыливание приводит к повышению влажности горной массы, что не всегда допустимо, увеличению влажности воздуха и обводнению забоев. В ряде случаев вода резко ухудшает состояние пород. В настоящее время ведутся значительные научно-исследовательские и производственно-экспериментальные работы по созданию систем пылеосаждения.

Если в результате лабораторного анализа установлено, что угольная пыль является взрывчатой, то такой пласт относят к опасным по пыли, а шахту переводят на пылевой режим. При разработке свиты пластов, включающих в себя опасные пласты, пылевой режим устанавливают во всех выработках, предназначенных для разработки опасных по пыли пластов, а также в выработках общешахтного назначения. Кроме того, создают защитную зону в выработках, соединяющих опасные по пыли пласты с неопасными.

Все мероприятия, составляющие суть пылевого режима, могут быть разделены на три группы:

- мероприятия, препятствующие образованию пыли и пылевого облака;
- мероприятия, препятствующие появлению источников воспламенения пыли;
- мероприятия по локализации взрывов пыли.

1.3.2. Мероприятия, препятствующие образованию пыли и пылевого облака

Пылеобразование зависит от технологических факторов и природных свойств разрабатываемых пластов, залежей и рудных тел. Так, на угольных шахтах удельное пылевыделение колеблется от 50 до 1000 г на 1 т добытого угля, а чаще всего составляет 100 – 200 г/т.

Применение машин с крупным сколом, орошение водой врубовой щели и угольной массы в момент ее разрушения комбайном, предварительное нагнетание воды в пласт, орошение водой в местах погрузки и разгрузки

угля, бурение с промывкой, сухое пылеулавливание, деятельная вентиляция – все эти мероприятия уменьшают выход пыли и предназначены для снижения ее концентрации до предельно допустимой по санитарным требованиям, которая в тысячи раз меньше нижнего предела ее взрываемости (ПДК составляет 4 мг/м^3 , нижний предел концентрации сильновзрывчатой пыли – $11...15 \text{ г/м}^3$).

Решающую роль в образовании пылевого облака имеет скорость движения воздуха в очистных и подготовительных забоях, а также у мест погрузки и перегрузки угля. Чем выше скорость, тем больше несущая способность потока, тем большее количество пыли переходит во взвешенное состояние. В большинстве случаев для разных по минералогическому составу пылей запыленность воздуха начинает возрастать при скорости его движения не менее $1,8 \text{ м/с}$. При расчетах необходимого количества воздуха по пылевому фактору при проектировании вентиляции и на действующих шахтах рекомендуют принимать в очистных забоях минимально допустимую скорость движения воздуха $0,9 \text{ м/с}$, а оптимальную – $1,6 \text{ м/с}$, в подготовительных забоях с конвейерной доставкой – соответственно $0,7$ и $1,3 \text{ м/с}$.

При использовании рельсового транспорта во избежание растряски и измельчения угля следует обращать внимание на исправность подвижного состава, избегать перегрузки вагонеток, поддерживать в надлежащем состоянии рельсовые пути.

В главных воздухоподающих выработках шахт воздух движется, как правило, со скоростью, близкой к максимально допустимой (8 м/с) и в три-четыре раза превышающей скорость, при которой начинается срыв пыли, осевшей в выработках или находящейся в транспортных сосудах. Поднятая в воздух пыль разносится по шахте, поэтому запрещается подача свежей струи воздуха по стволам, оборудованным скиповыми подъемами, опрокидными клетями, а также по наклонным стволам, уклонам и бремсбергам, оборудованным конвейерами, которые не имеют средств пылеподавления, обеспечивающих снижение запыленности до ПДК.

В выработках околоствольного двора откаточного горизонта, капитальных выработках со свежей струей воздуха, а также в выработках околоствольного двора вентиляционного горизонта и капитальных с исходящей струей воздуха осуществляют периодическую побелку.

Во всех горизонтальных и наклонных откаточных и вентиляционных выработках, расположенных на расстоянии более чем 200 м от лав, в тупиковых выработках вне призабойного участка при интенсивности пылеотложения до $1,2 \text{ г/(м}^3\text{/сут.)}$ поверхности пылеотложения обмывают водой. Участки (длиной 200 м) выработок, примыкающих к лавам, при интенсивности пылеотложения до $50 \text{ г/(м}^3\text{/сут.)}$ обмывают раствором смачивателя, при интенсивности от 50 до $200 \text{ г/(м}^3\text{/сут.)}$ связывают пыль с помощью туманообразующих завес и обмывают раствором смачивателя, при интенсивности более $200 \text{ г/(м}^3\text{/сут.)}$ – то же, что и в предыдущем случае, или

связывают пыль посредством смачивающе-связующей пасты в сочетании с установкой пылеулавливающих жалюзийных перегородок.

1.3.3. Мероприятия по локализации взрывов пыли

Взрыв взвешенной в воздухе угольной пыли может произойти от электрической искры, от раскаленных частиц взрывчатых веществ, вылетающих из шпура, и от других источников воспламенения [124]. Существенное влияние на взрыв угольной пыли оказывает присутствие метана (CH_4). Так, при отсутствии метана угольная пыль взрывается при содержании ее в воздухе не менее $30 - 40 \text{ г/м}^3$, а при наличии двух процентов CH_4 опасная концентрация пыли понижается до 10 г/м^3 , а при 3 % – до 5 г/м^3 . Для предупреждения взрыва достаточно снизить концентрацию пыли до 5 г/м^3 , а с учетом запаса – до 1 г/м^3 [191]. Эти мероприятия основаны на применении инертной пыли или воды с целью ограничения зоны дальнейшего распространения взрыва. К ним относят осланцевание выработок, применение сланцевых или водяных заслонов.

Смысл **осланцевания** горных выработок заключается в повышении зольности угольной пыли, осевшей в горных выработках, и образовании смеси угольной и инертной пыли в такой пропорции, которая не способна взорваться, будучи поднятой в воздух.

Осланцевание осуществляют вручную или с помощью специальных машин, позволяющих в течение шестичасовой смены обработать выработку площадью поперечного сечения $5 - 6 \text{ м}^2$ и длиной до 1000 м. Рабочих, занятых осланцеванием, снабжают противопылевыми респираторами и предохранительными очками.

Назначение заслонов – остановить взрывную волну и погасить горение пыли. Это достигается мгновенным увеличением зольности витающей пыли при опрокидывании полок взрывной волной и охлаждением газопылевого облака.

Заслоны в зависимости от применяемого материала делят на сланцевые и водяные.

Водяной заслон (рис. 1.1) устраивают из ряда сосудов вместимостью не более 80 л, при этом используют пластмассовые сосуды. Их устанавливают на дольных или поперечных рейках. Расстояние от кромки сосудов принимают не менее и не более 100 мм. Сосуды устанавливают на равном расстоянии друг от друга не менее чем через 500 мм. Общая длина заслона – до 30 м не менее. Количество воды в заслоне принимают за 400 л на 1 м^2 площади поперечного сечения. Выраженные заслоны устанавливают на расстоянии не менее и не более 250 м от возможного места взрыва.

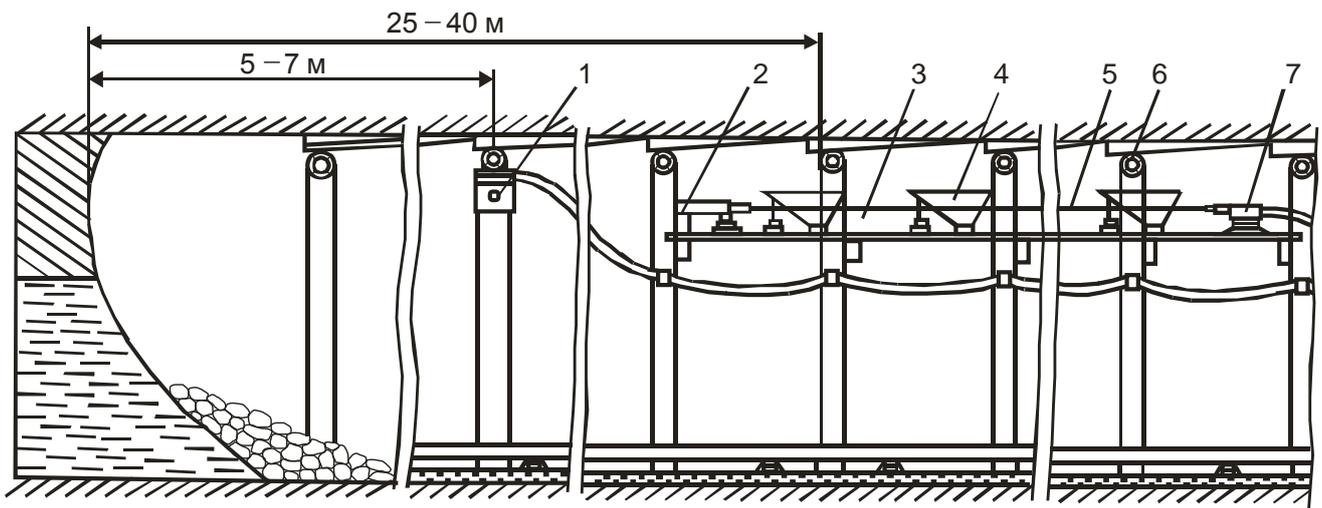


Рис. 1.1. Первичный водяной заслон с принудительным срабатыванием: 1 – фотоэлектрический датчик; 2 – механизм опрокидывания; 3 – опорная рейка; 4 – сосуд с водой; 5 – трос с кулачками; 6 – опоры; 7 – механизм спуска

Забои штреков, отстоящие от очистных забоев на 40 – 150 м, изолируют первичными водяными заслонами с принудительным срабатыванием. Заслоны состоят из сосудов, изготовленных из листов, которые заполняют водой из расчета 100 л на 1 м² поперечного сечения выработки, расстояние от забоя выработки – не более 40 м. В том случае, когда пыль взрывается, излучение улавливается фотоэлектрическим датчиком, заложенным в 5 – 7 м от забоя. Фототок взрывает электро-детонатор в механизме спуска, и заслон срабатывает, останавливая и гася пылевое облако.

Сланцевыми или водяными заслонами изолируют очистные забои, отдельные забои подготовительных выработок, проводимых по углю и породе, крылья шахтного поля в каждом пласте, конвейерные выработки, пожарные участки. Заслоны располагают как на входящей, так и исходящей струях изолируемого забоя или комплекса забоев и других объектов.

1.3.4. Причины и механизм возникновения шахтных пожаров

Большое разнообразие причин возникновения пожаров в поверхностных комплексах сильно затрудняет их профилактику. Наиболее часто повторяющиеся из них – это неправильное ведение огневых и сварочных работ, нарушение правил эксплуатации отопительных печей и устройств (включая электрические), электрических сетей и электрооборудования, самовозгорание угля и руд, разряды статического (в том числе атмосферного) электричества, взрывы пылегазовоздушных смесей и паров (в том числе компрессорных), искрообразование и перегрев при трении, особенно при работе ленточных конвейеров, подшипников, редукторов и канатов.

Причинами экзогенных пожаров в горных выработках чаще всего являются: неисправное электрооборудование и кабельные сети, взрывные и сварочные работы с нарушением правил их ведения, загорание метана в очаге самовозгорания и другие.

Наибольшее число экзогенных пожаров в угольных шахтах возникает от токов короткого замыкания в кабелях (50 – 60 %) и неисправности электрооборудования (18 – 20 %).

При производстве взрывных работ по углю и серной руде даже при соблюдении паспортных параметров возможны загорания метана, пыли, мелких кусочков угля и серы под действием теплового импульса взрыва, особенно при прорыве в призабойное пространство раскаленных газов и горящего ВВ по трещинам естественного происхождения в массиве или возникших при ведении горных работ.

Широкое применение ленточных конвейеров на шахтах повлекло за собой увеличение числа подземных пожаров от трения ленты о невращающиеся роlikоопоры, пробуксовывающие барабаны и элементы конструкций и крепи.

Причинами эндогенных пожаров являются: наличие материала, способного окисляться (скопление раздробленного угля, руды и угольного сланца), приток кислорода к окисляющейся поверхности частиц скопления, затрудненный отток тепла из очага самонагревания, сохранение в течение определенного времени указанных ранее трех условий для прохождения низко- и среднетемпературного окисления материала и перехода процесса в фазу возгорания.

Механизм самовозгорания. Основное условие самовозгорания – способность материала к окислению.

Механизм самовозгорания угля и руд имеет сходные черты и некоторые особенности.

При соприкосновении кислорода воздуха с углем при низких температурах (до 50 – 100 °С) кислород активно сорбируется (поглощается) поверхностью угля. В сорбции участвуют не только внешняя поверхность куска угля, но также внутренние поверхности пор и трещин, в которые имеется доступ. При сорбции 1 мл кислорода на поверхности угля выделяется 280,73 кДж на 1 моль кислорода. Склонность углей к самовозгоранию различна. Основная закономерность состоит в том, что с увеличением степени метаморфизма углей их склонность к самовозгоранию уменьшается, что связано с уплотнением молекулярной структуры и снижением их химической активности.

При низких температурах (ниже 50 – 100 °С) окисление угля идет медленно, поэтому в большинстве случаев образующееся тепло успевает рассеяться, и процесс можно считать изотермическим.

Самонагревание при низких температурах возможно только при наличии условий, затрудняющих теплоотдачу в среду, что имеет место, например, в больших скоплениях угля.

Медленное поглощение кислорода обуславливает выравнивание его концентрации в газовой среде вплоть до поверхности угля.

Только в том случае, если газ соприкасается с углем длительное время, концентрация кислорода в газовой среде может уменьшиться. Это явление наблюдают в изолированных или очень больших скоплениях угля при слабом притоке воздуха. Очевидно, что в этом случае необходимо учитывать движение воздуха, так как от него зависит приток кислорода. Если при этом происходит еще и самонагревание, то возможность притока воздуха приобретает основное значение.

Внутри куска угля кислород реагирует с веществом угля значительно быстрее, чем осуществляется приток кислорода к реагирующей поверхности. Поэтому именно приток кислорода в трещинах и порах управляет скоростью окисления угля, и это является главным определяющим элементом процесса.

Для низкотемпературного окисления характерна его зависимость от рода угля, химической природы, структуры и, главным образом, его газопроницаемости.

Механизм процесса можно представить следующим образом. Кислород из газовой среды притекает к поверхности угля преимущественно по трещинам. На этом пути он поглощается стенками трещин и через образовавшийся слой «оксиугля» (слой продуктов окисления) достигает вещества угля. Здесь он реагирует с отдельными атомными группами, входящими в состав вещества угля, образуя содержащие кислород атомные группы. Они медленно отщепляются и перегруппировываются в молекулы продуктов окисления (H_2O , CO_2 и др.). При низких температурах это отщепление происходит значительно медленнее, чем присоединение кислорода. Вследствие этого слой «оксиугля» на реагирующей поверхности угля утолщается и его сопротивление притоку кислорода увеличивается, поэтому окисление со временем замедляется.

Типичная форма низкотемпературного окисления сохраняется до температуры 100 – 150 °С. Выше некоторой температуры, различной для разных углей, скорость окисления начинает увеличиваться. Это объясняется главным образом распадом слоя «оксиугля» на реагирующем веществе угля, а также ускорением химической реакции под действием температуры.

Сульфидные руды сорбируют кислород в присутствии воды. При увлажнении скопления раздробленной сульфидной руды удельная скорость поглощения кислорода многократно возрастает. Практика и прямые измерения скорости сорбции кислорода показали, что наиболее склонны к возгоранию руды, существенную часть которых составляют пирит и марказит. Весьма инертны при окислении галенит и сфалерит. Все сульфидные руды по содержанию серы в пересчете на массовые доли можно разделить на три группы: неопасные, с содержанием серы менее 12 %, мало-

опасные, с содержанием серы 12 – 30 %, и опасные, с содержанием серы более 30 %.

Однако не менее важна природная и технологическая нарушенность, раздробленность руды. Нарастание скорости сорбции кислорода отстает от увеличения поверхности зерен, что говорит об участии в сорбции поверхности пор и трещин. Весьма важен фактор времени. В отличие от углей в сульфидах скорость сорбции вначале снижается, а затем может повыситься при неизменных внешних условиях.

С ростом температуры скорость сорбции кислорода нарастает (например, для Дегтярского месторождения – от 0,00016 мл/(г·ч) при 0 °С до 0,0012 мл/(г·ч) при 25 °С и 0,0065 мл/(г·ч) при 50 °С).

При окислении сульфидов не образуется хорошо выраженный окислой, как при окислении угля. Хотя слой продуктов окисления на поверхности и нарастает, он имеет рыхлую структуру вследствие гидратации продуктов окисления, осложненной растворением.

Большое значение для возникновения эндогенного пожара имеют геолого-горнотехнические факторы.

В настоящей работе рассмотрена математическая модель процесса взрыва облака метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт. Проведен анализ способа защиты горных выработок от разрушительного воздействия взрывов путем создания водяных завес для снижения концентрации угольной пыли в воздухе.

1.4. Состояние проблемы управления экологической безопасностью при проведении погрузочных и разгрузочных работ в морских портах

Запыленность воздуха является одним из главных неблагоприятных факторов ухудшения условий труда, здоровья работников предприятий и загрязнения окружающей среды. Запыленность также негативно влияет на условия жизни и здоровье людей, проживающих в непосредственной близости к объектам «пылящего» производства. Образование пыли на многочисленных промышленных объектах вполне объяснимо: добыча, дробление, обработка и переработка, разгрузка и погрузка, транспортировка продукта – все это технологические процессы, без которых не обойтись.

Согласно санитарным нормам снижение запыленности воздуха обеспечивается герметизацией узлов перегрузки и регулярным орошением водой транспортных штреков при проведении работ. В камерах разгрузки и дробления применяются обеспыливающие установки с рукавными фильтрами. Все работающие в атмосфере с повышенной запыленностью обеспечиваются индивидуальными средствами защиты от пыли, респираторами.

В Украине на сегодня разработано ряд способов обеспыливания воздуха, основанных на применении орошения, аспирации и очистки запыленного воздуха, а также пены и других методов.

Однако зачастую эти методы оказываются малоэффективными вследствие несоответствия технологических параметров пылеподавления применительно к конкретному источнику пылеобразования и ввиду невозможности согласовать оптимальную работу пылеподавляющих устройств с работой технологического оборудования по причине высокой стоимости и т.п.

Практически остается нерешенной проблема обеспыливания воздуха в условиях технологических процессов, при которых площадь источника пылевыделения и объемы запыленного воздуха имеют большие размеры. К таким источникам относятся технологические процессы погрузки-разгрузки железнодорожных вагонов с сыпучими пылящими материалами, разгрузка сыпучих материалов ленточными конвейерами в открытые склады и другие неорганизованные источники пылевыделения с большим объемом запыленного воздуха.

Широкое распространение получили системы пылеподавления туманом, которые эффективно нейтрализуют любую взвешенную пыль, включая асбестовую и угольную, и, при профессиональном походе к вопросу ее построения, позволяют уменьшить концентрацию взвешенной пыли в воздухе до 90 %. В качестве пылеподавляющих устройств используются обычные распылители. При этом необходимо учитывать, что в процессе создания водяной завесы размер капли, предназначенной для захвата угольно-пылевой частицы, варьируется от 50 до 250 мкм, что существенно влияет на захват и осаждение угольной пыли.

В отличие от обычных распылителей атомайзеры способны создавать мелкодисперсную водовоздушную смесь со взвешенными водяными частицами, характерный размер которых составляет порядка 20 – 40 мкм [61, 80, 287]. Натурные испытания с отдельными экспериментальными образцами атомайзеров показали способность не только создавать частицы заданного размера, но и существенно снижать расход жидкости при создании водяновоздушной завесы. Создание и удержание водяновоздушного облака гораздо эффективнее, чем при обычных распылителях. Системы обеспечивают:

- экономию энергоресурсов и воды;
- улучшение условий труда;
- очищение, увлажнение и охлаждение рабочих зон;
- содействие в сохранении здоровья рабочих предприятия и населения, проживающего рядом с предприятием;
- экологическую безопасность производственного объекта;
- улучшение условий эксплуатации оборудования.

Преимущества атомайзеров:

- применяются для пространств, в которых использование других систем невозможно, неэффективно или крайне дорого;
- имеют эффективность, экономичность и экологичность работы;
- возможны варианты стационарных или мобильных систем;
- могут применяться локально, в определенном пространстве, на улице или в помещении;
- могут встраиваться в существующую систему пылеподавления, делая ее работу более эффективной и экономичной;
- при правильной настройке системы не перенасыщают влагой окружающее пространство, оборудование.

Объекты для применения:

- горнодобывающие и горнообогатительные комбинаты, включая отдельные линии оборудования;
- шахты, карьеры, цементные заводы, оборудование для дробления пород, скальных грунтов;
- порты и железнодорожные грузовые станции, углепогрузочные станции и пункты;
- пункты перевалки и хранения «пылящих» продуктов (уголь, щебень, цемент, песок, шлак и т.д.);
- любые конвейерные линии – полностью или локально, в местах их загрузки/разгрузки;
- строительные площадки, районы строительства, включая площадки демонтажа старых зданий и сооружений;
- литейные производства, производства и линии обработки металла;
- элеваторы и зерновые силосы;
- любые другие производства, на которых в пространство выделяется пыль.

Особую роль играет вопрос выброса пыли в окружающую среду при погрузочно-разгрузочных работах в портах.

При проектировании и строительстве портов, где будут осуществляться погрузочно-разгрузочные работы с опасными и вредными грузами, необходимо учитывать требования для морских портов «Правила морской перевозки грузов в портах» и «Правила безопасности труда на погрузочно-разгрузочных работах в портах и на пристанях». Кроме того, следует выполнять методические рекомендации «Организация и проведение санитарно-гигиенического надзора при перегрузке и перевозке пылящих навалочных грузов в портах».

При проектировании и эксплуатации портов необходимо предусматривать устройства, которые полностью или максимально исключают выделение пыли (паров) и газов в атмосферу. При этом должны обеспечиваться:

- комплексная механизация, автоматизация и дистанционное управление перегрузочными процессами, а также автоматическая сигнализация о ходе отдельных работ и операций, связанных с возможностью выделения вредных веществ;

- применение унифицированных специальных обеспыливающих технических средств, защитных устройств, санитарно-технических установок, высокоэффективных средств очистки выбросов, создание санитарно-защитных зон;

- применение устройств и приборов для измерения и постоянной регистрации количества поступающих в атмосферу и акваторию вредных веществ, а также устройств для регулирования величин выбросов за счет изменения степени очистки и технологического режима перегрузочного процесса;

- автоблокировка перегрузочного оборудования с очистными аспирационными и другими санитарно-техническими устройствами.

При перегрузке навалочных и насыпных грузов грейферными кранами (установками циклического действия) должны соблюдаться следующие условия:

- обеспечение плавности перегрузочного цикла;

- недопущение переполнения грейфера грузом;

- наличие на грейферах, ковшах и других емкостях, в которых осуществляется перемещение груза, соответствующих уплотнений, предотвращающих высыпание груза;

- ограничение в пределах 1,5 – 2,5 м высоты падения груза в местах его высыпания из грейферов;

- использование специальных пылеподавляющих насадок на бункеры, в которые высыпается груз.

На установках конвейерного транспорта для борьбы с пылеподавлением должны быть предусмотрены:

- автоматизация процесса разгрузки (погрузки) железнодорожных вагонов и автотранспорта, при которых исключается присутствие людей в запыленной зоне;

- локализация пыли в узлах разгрузки (погрузки) вагонов и автотранспорта, а также в узлах пересыпки путем устройства

соответствующих укрытий, с применением аспирационных установок с очисткой удаляемого воздуха;

- применение специальных схем обеспыливания (гидрообеспыливание, обработка груза специальными веществами, снижающими его пылеобразующую способность);

- пылеподавляющие насадки на разгрузочных рукавах в узлах передачи груза на судно.

На пневмотранспортных установках по перегрузке навалочно-насыпных грузов для борьбы с пылевыделением должны обеспечиваться следующие условия:

- высокая степень герметичности трубопроводов, отсутствие в них внутренних шероховатостей, резких изгибов и переходов; оздуходувных машин с возможностью регулирования параметров пневмотранспортного процесса;

- эффективные пылеотделители.

В проектах портов, где будут перегружать химически опасные и пылящие фумигированные грузы, необходимо предусматривать установки для обеспыливания грузовых площадок и подъемно-транспортного оборудования, дегазации, дезактивации спецодежды, спецобуви и средств индивидуальной защиты.

В ППК, где есть пылящие грузы, в санблоках должны предусматриваться обеспыливающие устройства.

В проектах новых, расширяемых, реконструируемых портов необходимо привести уровни прогнозного расчета загрязнений атмосферного воздуха населенных мест с учетом фоновое (существующее) загрязнение.

В проекте должны быть предусмотрены решения по обеспечению соблюдения ПДК вредных веществ в атмосферном воздухе населенных пунктов в период метеорологических условий, неблагоприятных для рассеивания промышленных выбросов (штиль, инверсии, туманообразование и др.), когда может происходить резкое временное возрастание загрязнения атмосферного воздуха.

Анализ результатов, полученных различными авторами, по решению проблем создания систем управления экологической безопасностью для снижения рисков таких опасностей, как неорганизованное пылеобразование, степные и лесные пожары, пожары и взрывы при проведении работ в угольных шахтах, позволяют перейти к рассмотрению методологических основ разработки эффективных систем, использующих многофазные дисперсные структуры.

2. МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ МНОГОФАЗНЫЕ ДИСПЕРСНЫЕ СТРУКТУРЫ

2.1. Системный подход к разработке систем управления экологической безопасностью, использующих многофазные дисперсные структуры

В настоящее время для решения сложных технических, технологических, экономических и других проблем широко применяют системный подход. Его использование вполне объяснимо теми преимуществами, которыми он обладает, а именно: этот научный подход позволяет рационально формулировать и решать сложные проблемы, характеризующиеся способностью структурирования и выделения отдельных задач как относительно самостоятельных частей единой системы с учетом располагаемых ресурсов.

Эффективность системного подхода подтверждена практикой разработки сложных систем и их успешного внедрения в различные отрасли экономики [37, 52, 72, 73, 79, 178, 275].

Общие идеи и методы системного анализа и синтеза развиты в достаточной мере, однако в области их применения к такой своеобразной проблеме, как разработка систем управления экологической безопасностью, до настоящего времени развиты недостаточно.

Системный подход определяется следующими отличительными признаками: постановка и формулировка целей и задач; разработка общей модели, соответствующей реальному объекту исследования с учетом требований на ограничения; декомпозиция модели на компоненты и установление связей между ними; разработка алгоритмов и методов анализа и последующего синтеза компонентов.

Приняв системный подход в качестве методологической основы достижения поставленной в научном исследовании цели и для решения основных задач, отметим его теоретические возможности и приемлемость для исследуемого объекта – процессов управления экологической безопасностью, использующих многофазные дисперсные структуры.

2.2. Система управления экологической безопасностью, использующая многофазные дисперсные структуры, как сложная организационно-технологическая система

Управление экологической безопасностью представляет собой динамический процесс, развивающийся и совершенствующийся в неотрывной связи и взаимодействии с научными исследованиями, конструкторско-технологической и организационно-технической подготовкой к управлению этого процесса.

Каждая из составляющих системы управления экологической безопасностью является весьма сложной и большой целевой подсистемой, характеризующейся определенными функциями, методами и средствами их практической реализации. Все они имеют тенденции к развитию и совершенствованию.

Исследование проблемы управления экологической безопасностью, ее структуры и функций с учетом многообразия систем управления, средств реализации технологических процессов управления и исполнителей, которые могут их выполнять, форм организации процессов управления, связанных между собой определенными отношениями и находящихся в противоречивом взаимодействии, свидетельствует о том, что процесс управления экологической безопасностью следует рассматривать как сложную организационно-технологическую систему (СОТС).

Как любая сложная система, управление экологической безопасностью состоит из множества компонентов, формирующихся исходя из их функциональных характеристик и взаимоотношений в процессе функционирования системы в целом. Это позволяет представить систему в виде модели, удобной для аналитического исследования и синтезирования компонентов-подсистем собственно системы и внешней среды (рис. 2.1).

Структуру собственно системы управления экологической безопасностью можно представить как совокупность функционально связанных процессов определения пространственных и временных показателей системы постановки мелкодисперсной водяной завесы, управления процессами получения мелких капель и постановки мелкодисперсной водяной завесы, специального технологического оснащения и оборудования. Кроме того, сюда необходимо включить обеспечивающие компоненты внутри системы: организацию выполнения технологических процессов управления экологической безопасностью и получение заданных планово-экономических показателей.

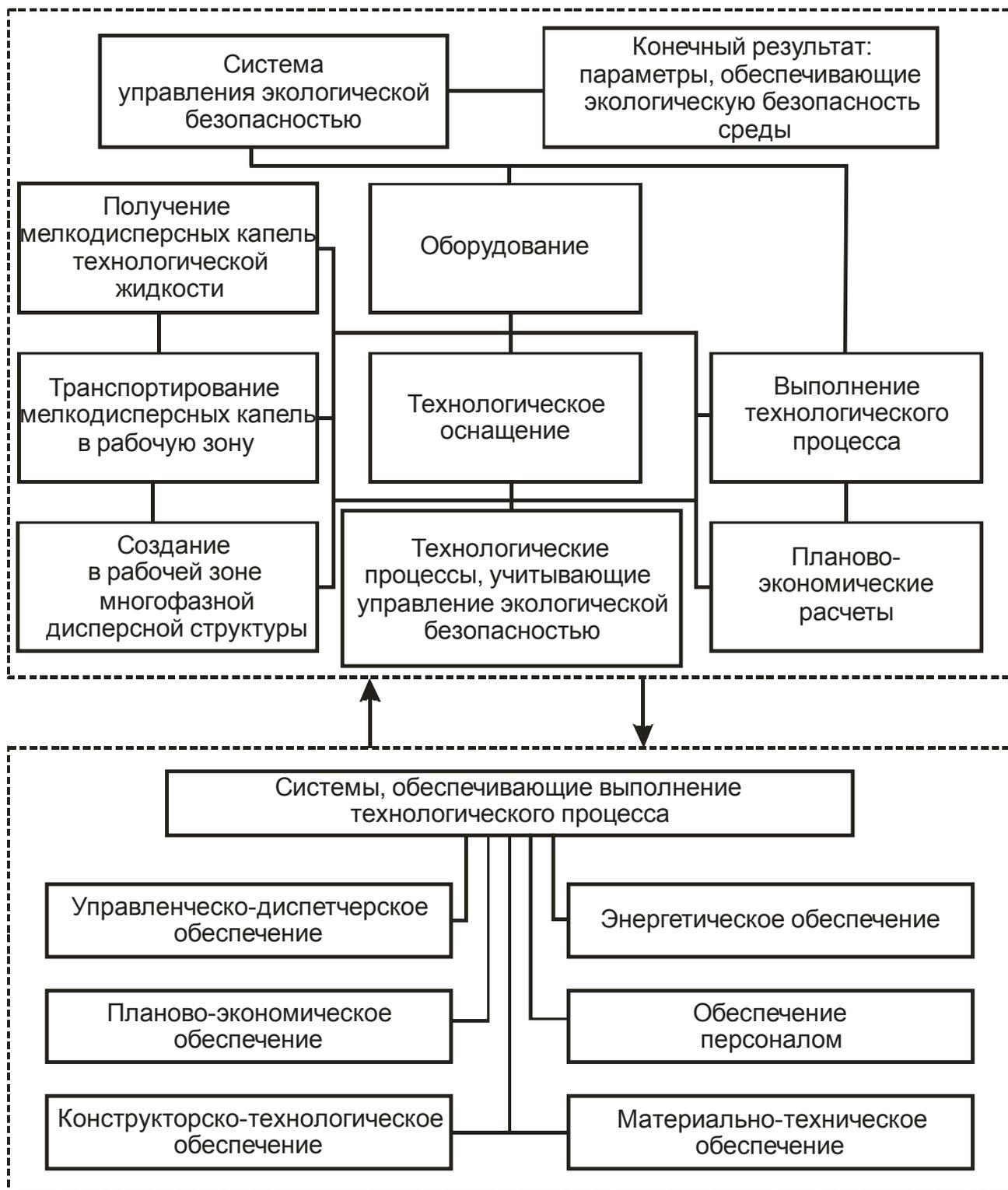


Рис. 2.1. Структура системы управления экологической безопасностью, использующей многофазные дисперсные компоненты

Комплекс внешних компонентов, обеспечивающих и поддерживающих в нормальном функциональном состоянии систему управления экологической безопасностью, состоит из совокупности подсистем: обеспечивающих конструкторской документацией и разрабатывающих технологическую до-

кументацию; обеспечивающих технологической оснасткой и оборудованием; поставляющих исполнителей необходимого качества и количества; обеспечивающих заданный уровень санитарно-гигиенических норм на производственных участках; обеспечивающих энергетическое и материальное снабжение (вода, ПАВ и др.), поддержание оборудования и технологического оснащения в рабочем состоянии; обеспечивающих планирование управлением экологической безопасностью.

Не ставя перед собой задачу анализа различных интерпретаций понятия «система», принимаем, что под общее понятие «система» подходит любое упорядоченное определенным образом множество объектов (или их элементов), связанных взаимными отношениями, обладающее целостностью. При этом целостность как одно из фундаментальных свойств системы означает, что, хотя свойства системы не всегда однозначно определяются только свойствами ее компонентов, все компоненты системы в то же время прямо или косвенно связаны друг с другом и удаление, изменение или добавление компонентов ведет к изменению соотношения между остальными компонентами системы.

Основная цель функционирования рассматриваемой СОТС – управление экологической безопасностью с минимальными затратами трудовых и материальных ресурсов – достигается всем комплексом компонентов как основной системы, так и систем обеспечивающей внешней среды. Любые изменения компонентов (например, изменение номенклатуры оборудования, оснащения и т. д., используемого в процессе управления экологической безопасностью) приводят к изменению качественных показателей состояния окружающей природной среды и себестоимости обеспечения экологической безопасности, т. е. могут оказать принципиальное воздействие на выходной продукт, ради которого строится и функционирует система.

Совокупность составляющих СОТС компонентов в их взаимосвязи образует структуру системы, которую удобно представлять в виде схемы иерархических уровней компонентов системы. Выделение компонентов-подсистем как относительно самостоятельных частей общей большой системы является целесообразным и методическим приемом для аналитического исследования любой сложной системы, в том числе и организационно-технологической системы СОТС управления экологической безопасностью. При этом степень детализации и количества иерархических уровней общей системы определяется реальными потребностями исследования. Связи между компонентами-подсистемами в иерархической структуре системы устанавливаются по принципу подчинения, когда один из двух взаимосвязанных компонентов является определяющим в их совместном функционировании, или согласования, когда оба взаимосвязанных компонента равноценны в их совместном функционировании.

Применительно к модели СОТС управления экологической безопасностью иерархическое построение ее структуры и установление структурных связей между компонентами означают, например, следующую подчиненность ее технологических компонентов: невозможно разработать и изготовить технологическое оснащение или определить номенклатуру необходимого оборудования, не разработав предварительно технологические процессы управления экологической безопасностью. Изменение технологии (например, переход на другой метод создания мелкодисперсной водяной структуры) ведет к изменению как состава и конструкции оснащения, так и состава необходимого оборудования.

В то же время между компонентами «технологические процессы» и «организация выполнения технологических процессов» может быть установлена связь согласования.

Если из внешней среды в качестве обособленной системы выделяется определенная совокупность взаимосвязанных частей, множество не вошедших в систему объектов образует внешнюю среду, взаимодействующую с выделенной системой и оказывающую влияние на изменение состояния системы в процессе ее функционирования.

В зависимости от формулировки целей и задач исследования методологические подходы при решении вопроса о выделении из внешней среды обособленной системы позволяют относить те или иные компоненты-подсистемы внешней среды к основной системе. При этом система должна обладать свойством конечности как принципиальной возможности ее практической реализации в оптимальные сроки и с рациональными затратами потребных ресурсов на ее создание.

В соответствии с поставленной целью научного исследования и задачами, решаемыми для ее достижения, выделены те компоненты из общей системы СОТС, которые существенным образом влияют на рационализацию этапов подготовки к управлению экологической безопасностью (конструкторского, технологического и организационного) и собственно управление экологической безопасностью (работа с оборудованием, постановка мелкодисперсной водяной завесы и др.).

Для формализации решения задач рационального управления экологической безопасностью использован принцип многоуровневой декомпозиции, характеризующийся расчленением процесса проектирования систем управления экологической безопасностью на иерархические уровни функционально завершенных этапов решения комплекса подзадач данного уровня (рис. 2.2).

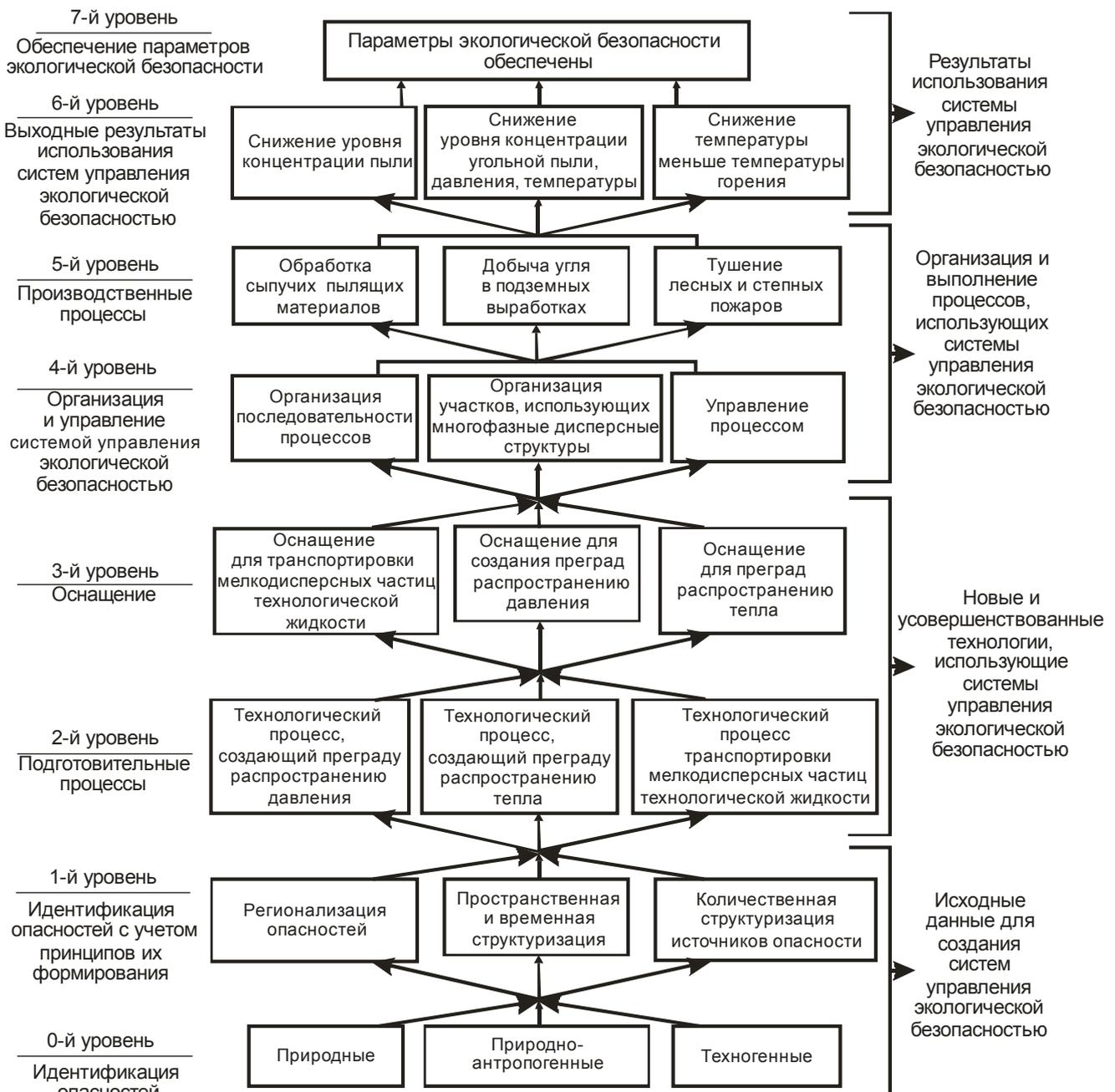


Рис. 2.2. Многоуровневая декомпозиция решаемых задач управления экологической безопасностью

Прежде всего, необходимо выяснить тип опасности в зависимости от характера ее происхождения. По существующей классификации [79, 91, 275, 282] опасности можно разделить на природные и антропогенные. К последним относят и такие, для которых антропогенные факторы не являются определяющими. Эти опасности, например пожар, пылевое загрязнение и другие, могут инициироваться по принципу «спускового крючка» (триггерного эффекта), то есть деятельность человека стимулирует возникновение такой опасности. С другой стороны, существует ряд процессов хозяйственной деятельности, которые непосредственно генериру-

ют опасности, например загрязнение атмосферы или гидросферы отходами производства и потребления. Они, естественно, есть источниками техногенной опасности, что, безусловно, требует их учета при разработке системы управления экологической безопасностью.

На исходном – нулевом – уровне проводят сбор информации о возможности возникновения опасностей, для управления которыми можно использовать многофазные дисперсные структуры.

На первом уровне определяют основные закономерности формирования экологической опасности – регионализацию (каждый регион отличается своими приоритетами и иерархией структур опасностей, которые обуславливают специфику анализа и возможного развития опасности), пространственно-временную структуризацию опасности (совокупность экологически опасных объектов любого генезиса, которые вследствие взаимодействия и взаимного влияния генерируют опасность) и позиционирование источников опасности (учитывается не только пространственное расположение источников опасности по отношению к различным объектам, но и характер среды, в которой эта опасность распространяется). Этот уровень завершается разработкой вариантов принципиальных схем систем управления экологической безопасностью с учетом располагаемых ресурсов и их разновидностей.

Второй уровень охватывает подготовительные процессы по созданию системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур: технологический процесс создания дисперсной структуры, поглощающей тепло или создающей преграды распространению давления, например взрыва; технологический процесс транспортировки мелкодисперсных частиц в зону, где располагаются источники опасности; технологический процесс поглощения тепла и др.

На третьем уровне определяют оснащение, необходимое для осуществления технологий, обеспечивающих экологическую безопасность, а именно оснащение технологических процессов технологической оснасткой и оборудованием, в том числе и нестандартным, а также средствами обеспечения безопасной работы рабочих. Специфика решения задач этого уровня заключается в необходимости учета масштабов производственных процессов и сроков их реализации.

Четвертый уровень характеризуется решением задач организации экологической безопасности и управления ею и включает в себя выбор организационных форм последовательности процесса, организацию участков выполнения технологических процессов, диспетчеризацию и управление ходом технологических процессов на рабочих местах. Решение задач этого уровня можно условно отнести к этапу разработки организационной подготовки управления экологической безопасностью.

Пятый уровень – задачи организации собственно производственных процессов с учетом обеспечения экологической безопасности: формирование и функционирование участков обработки сыпучих пылящих матери-

алов, формирование и функционирование средств защиты лесного фитоценоза и растительного покрова от пожара, снижение последствий взрывов метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных выработках угольных шахт.

На шестом уровне в результате реализации предлагаемого технологического процесса на указанных участках достигаются выходные результаты обеспечения экологической безопасности, а именно: снижение концентрации пылевых частиц (и особенно взвешенных пылевых частиц) в рабочей зоне погрузки или разгрузки пылящих сыпучих материалов; снижение концентрации угольных частиц в подземных выработках угольных шахт и снижение вероятности возникновения взрыва метана в подземных выработках угольных шахт, снижение температуры горючих веществ при пожаре в природных экологических системах.

К высшему, седьмому, уровню системы условно отнесены результаты работы системы обеспечения экологической безопасности – параметры среды, величина которых будет ниже критических значений (давления, температуры, скорости движения, времени пребывания в зоне с заданным режимом, соотношения смешивающих компонентов, концентрации веществ и др.).

При таком построении иерархической структуры системы управления экологической безопасностью соблюдены основные принципы многоуровневой декомпозиции: наличие вертикальных и горизонтальных связей между уровнями и этапами; приоритетность действия уровней и этапов сверху донизу; взаимозависимость уровней; вариантность выбора и решения задач каждого уровня.

2.3. Системный подход как условие повышения эффективности систем управления экологической безопасностью, использующих многофазные дисперсные структуры

Решение задач рационального осуществления процесса в больших и сложных системах возможно при выполнении следующих условий:

1. Наличие корректной модели объекта рационализации, т.е. такой модели, которая в должной мере была бы адекватной реальному объекту и удобной для математической обработки.

2. Указание области определения или существования модели, т.е. всех ограничений, которые требуют своего учета.

3. Установление критериев рационализации, которые являются правилами выбора предпочтительного варианта решения задач.

Как показано в многочисленных исследованиях теории систем, большинство исследователей прибегают при описании модели системы **S** к ее абстрактному представлению в виде множеств входных **X** и выходных **Y** параметров, взаимодействующих и преобразующихся благодаря объективным отношениям **R** между ними и их свойствами:

$$S = (X, R, Y). \quad (2.1)$$

В данной научной работе в зависимости от особенностей рассматриваемых и решаемых задач рационального формирования мелкодисперсных структур могут быть использованы различные формы представления моделей – аналитические, графоаналитические, лексикографические.

Процесс рациональной постановки мелкодисперсных структур с использованием моделей будем рассматривать как метод отыскания рационального решения для реальной системы без непосредственного экспериментирования с самой системой. При этом требование корректности модели рационального формирования многофазных дисперсных структур, обеспечивающих минимальные затраты ресурсов при обеспечении производственной и экологической безопасности, означает, что при формировании модели следует учитывать важнейшие характеристики системы, не перегружая ее менее существенными. Однако при этом теряется степень адекватности модели реально существующей системе. Соответствие, качество модели можно оценить лишь путем сопоставления результатов, полученных на модели и в реальной системе. Следовательно, теоретические результаты исследований должны быть проверены экспериментом или практикой использования их в реальных производственных условиях.

2.4. Формирование концепции создания модели управления экологической безопасностью, использующей многофазные дисперсные структуры

Техническая подготовка к реализации процессов управления экологической безопасностью и процесс формирования мелкодисперсных структур представляют собой единую систему, направленную на создание системы управления экологической безопасностью. В процессе технической подготовки к реализации процессов управления экологической безопасностью необходимо, исходя из имеющейся нормативной и технологической документации, проведенных экспериментальных исследований, выполнить пространственно-временное структурирование опасности, количественных показателей опасности. Следует принять схемы реализации систем управления экологической безопасностью. На основании этих материалов осуществляют разработку технологических процессов, использующих мелкодисперсные структуры, проектирование и изготовление средств оснащения для проведения процессов, определяют формы организации выполнения технологических процессов, обеспечивающих экологическую безопасность, и проводят организацию производственного процесса.

Таким образом, интегрированная модель процессов управления экологической безопасностью, отражающая многообразие факторов, влияющих на содержание работ по обеспечению экологической безопасности, может

быть скомпонована только при условии ее декомпозиции и разработки относительно самостоятельных моделей отдельных комплексов подготовки к обеспечению экологической безопасности. Принципиальная схема формирования интегрированной модели создания системы управления экологической безопасностью показана на рис. 2.3.

Так как подготовка к реализации экологически безопасных технологий требует больших затрат времени и средств, то возможность экспериментальной проверки различных вариантов для решения отдельных задач разработки системы управления экологической безопасностью практически исключена. В этих условиях моделирование и определение рациональности принимаемых решений является единственным и весьма эффективным способом, позволяющим решать задачи с помощью вычислительной техники с минимальными затратами и большой точностью.

2.5. Методологическая схема решения поставленных задач исследования

С учетом изложенных выше положений системного подхода к решению сложных проблем, а также специфических особенностей создания системы управления экологической безопасностью в результате научного исследования практически реализована следующая схема (рис. 2.4) решения задач:

1. Постановка задач и изучение информации к поставленным задачам для окончательной формулировки задач исследования.
2. Разработка моделей в описательной, математической или других формах представления.
3. Выбор критериев эффективности или критериев принятия решений для рационализации исследуемых систем управления экологической безопасностью.
4. Разработка методов и средств для решения поставленных задач, в том числе разработка вычислительных алгоритмов и программ для реализации их с помощью вычислительной техники.
5. Экспериментальные исследования теоретических разработок, включая проверку их в производственных условиях.
6. Разработка рекомендаций и нормативно-технической документации для практического использования предложенных и исследованных методов и средств, а также оптимизационных моделей систем управления экологической безопасностью.

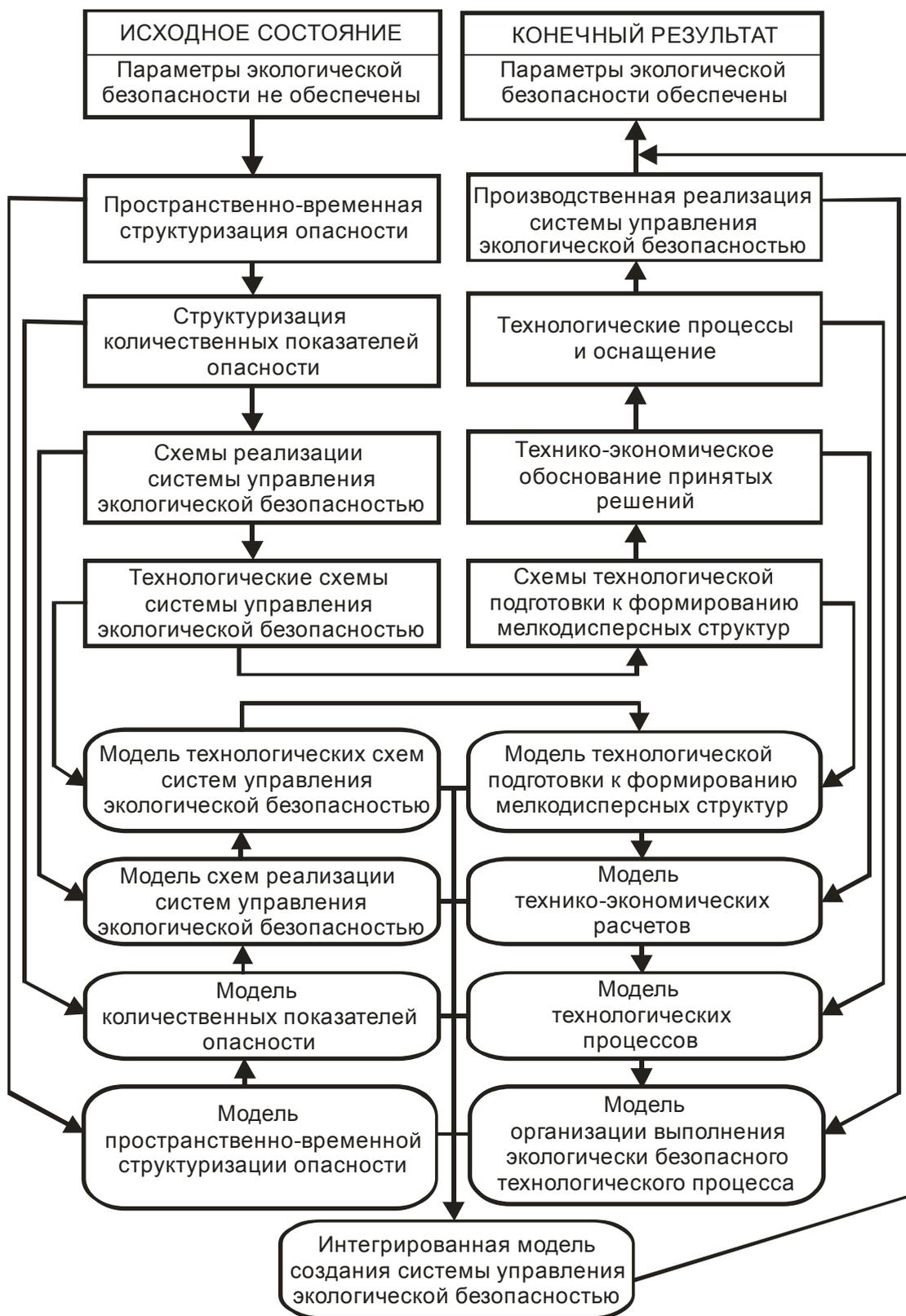


Рис. 2.3. Схема формирования интегрированной модели системы управления экологической безопасностью, использующей многофазные дисперсные компоненты



Рис. 2.4. Схема решения задач создания системы управления экологической безопасностью

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАНОВКИ МНОГОФАЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУР, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

3.1. Использование многофазных дисперсных структур при обеспечении экологической и техногенной безопасности

Под дисперсными многофазными структурами мы понимаем структуры, состоящие из мелкодисперсных частиц технологической жидкости или воды, воздуха и включенных частиц (частицы пыли, химических компонентов, биодеструкторов), которые устанавливаются в рабочей зоне и могут существовать в ней заданное технологическим процессом время. Простейшей структурой может быть водяная завеса –

поток распыленной воды, состоящий из мелких капель, способный частично или полностью отделить одну область пространства от другой. Водяные завесы (ВЗ) широко применяются в современных стационарных системах обеспечения техногенной безопасности, например в системах противопожарной защиты, а также являются одним из средств защиты людей и техники во время тушения пожаров. Постановка ВЗ и завес из нейтрализующих растворов – это основной способ ограничения распространения и нейтрализации облаков, образующихся при выбросе (проливе) аварийно химически опасных веществ (АХОВ) (аммиак, хлор, окислы азота, сернистый газ, хлористый и фтористый водород, окись этилена, фосген и др.) [ГОСТ Р 22.1.10-2002].

Для постановки ВЗ используются распылители различной конструкции: щелевые распылители, распылительные стволы (рис. 3.1, а), рукавные распылители, комбинированные установки (мобильная завеса) или дренажные оросители (стационарная завеса) (рис. 3.1, б).

До настоящего времени отсутствуют теоретически обоснованные методики расчета режимов формирования водяных завес, которые бы позволили определить расчетным путем их основные параметры: геометрические размеры в различных условиях, пространственное распределение концентрации капель, взаимодействие с воздушными и тепловыми потоками, влияние технических параметров, методы их оптимизации.

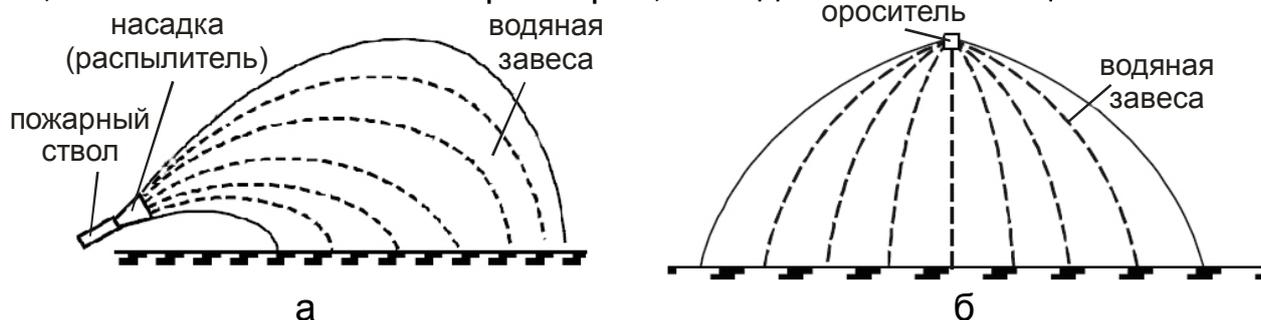


Рис. 3.1. Схемы водяных завес

Опыт проектирования систем постановки ВЗ показывает необходимость углубленного исследования процессов доставки диспергированной воды и ее дальнейшего осаждения с целью организации необходимой пространственной структуры водяного аэрозоля и выработки на этой основе эффективных конструктивных решений.

В настоящее время численный эксперимент становится одним из наиболее экономичных и удобных способов детального анализа сложных процессов в аэродисперсных средах.

В данном разделе представлены методика и результаты численного исследования возможности доставки диспергированной воды на необходимые высоту и дальность от режимов подачи воды системой постановки ВЗ на основе атомайзера. Объектом исследова-

ния является процесс постановки ВЗ с помощью системы на основе атомайзера (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Постановка ВЗ атомайзером

Предмет исследования – зависимость возможности доставки диспергированной воды на необходимые высоту и дальность от режимов подачи воды системой постановки ВЗ на основе атомайзера.

3.2. Численная модель процесса постановки мелкодисперсных водяных завес

Наиболее универсальное теоретическое описание процесса постановки ВЗ возможно на основе непосредственного применения законов сохранения массы и количества движения к неоднородной по фазовому составу среде, включающей атмосферный воздух и водяные капли. Математической формой записи законов сохранения для вязкого газа являются уравнения Навье – Стокса, для капель – уравнение баланса действующих на каплю сил, уравнивающего ее инерцию с равнодействующей сил тяжести и аэродинамического сопротивления. Эти уравнения в области произвольной формы с заданными краевыми условиями могут быть совместно решены современными численными методами, выделившимися в самостоятельную отрасль знаний – вычислительную аэрогидродинамику.

3.2.1. Физико-математическая постановка задачи

При математическом описании аэродисперсной среды были приняты следующие основные допущения:

- течение несущей газовой фазы несжимаемое, изотермическое, турбулентное;
- турбулентность изотропная;
- капли сферические, неиспаряющиеся;
- объемом, занимаемым каплями, пренебрегаем.

Взаимодействие фаз учитывалось с помощью модели «капля – источник в ячейке», в соответствии с которой присутствие частиц в потоке проявлялось через дополнительный источник количества движения в осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье–Стокса, замыкавшихся полуэмпирической моделью турбулентности k - ε -типа.

3.2.2. Модель газовой фазы

В основу математической модели трехмерного квазистационарного турбулентного течения газовой среды в рабочей зоне положена система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса.

Уравнения сохранения массы и количества движения в векторной форме записи имеют вид [135]

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + S_f, \quad (3.2)$$

где ρ – плотность; \vec{u} – вектор скорости; p – статическое давление; S_f – источник количества движения, обусловленный межфазным взаимодействием; τ – тензор напряжений, определяемый выражением

$$\tau = (\mu + \mu_T) \left(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right),$$

где μ – молекулярная вязкость; μ_T – турбулентная вязкость.

Для замыкания системы осредненных по Рейнольдсу уравнений (3.1), (3.2) использована k - ε -модель турбулентности Лаундера–Сполдинга [313]. Уравнения переноса кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon, \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (3.4)$$

где ρ – плотность; k – кинетическая энергия турбулентности; u_i – проекции осредненной скорости газа на оси трехмерной прямоугольной декартовой системы координат; x_j – координаты трехмерной прямоугольной декартовой системы координат; μ – динамическая вязкость; μ_T – турбулентная вязкость; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ – эмпирические коэффициенты; G – член, характеризующий генерацию кинетической энергии турбулентности за счет сдвиговых напряжений и определяемый выражением

$$G = -\overline{\rho u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}.$$

Турбулентная вязкость определяется по формуле Колмогорова–Прандтля

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3.5)$$

где C_μ – эмпирический коэффициент.

Для определения источникового члена S_f в уравнении (3.2) используется модель межфазного взаимодействия.

Граничные условия. Система дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) (3.1) – (3.4) дополняется соответствующими граничными условиями для независимых переменных.

На границах расчетной области задавались следующие граничные условия непрерывной фазы: на выходе сопел атомайзера или распылителя – скорость воздуха, соответствующая атмосфере скорость ветра, на остальных границах – соответствующая атмосфере скорость ветра, статическое давление, на твердых поверхностях – условие прилипания, аппроксимируемое функцией стенки.

Непосредственное применение условия прилипания требует модификации модели турбулентности в пристеночной области, где турбулентная вязкость близка к молекулярной, и значительного измельчения расчетной сетки вблизи стенки. Опыт численного моделирования трехмерных течений показывает, что сложность геометрической формы расчетной области часто приводит к тому, что именно потребная размерность расчетной сетки становится тем критическим параметром, который определяет возможность проведения вычислительного эксперимента на располагаемой технической базе. Поэтому вместо условия прилипания для описания турбулентного пограничного слоя используются функции стенки – набор полуэмпирических функций, связывающих значения независимых переменных в центре пристеночной расчетной ячейки (точке P) со значениями соответствующих переменных на стенке и базирующихся на предположении Лаундера и Сполдинга [316].

Закон стенки для осредненной скорости имеет вид

$$U^* = \begin{cases} y^* & \text{при } y^* \leq 11,225, \\ \frac{1}{K} \ln(Ey^*) & \text{при } y^* > 11,225, \end{cases} \quad (3.6)$$

где K – постоянная Кармана; E – эмпирическая постоянная.

Безразмерные параметры U^* и y^* определяются выражениями

$$U^* = \frac{U_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\tau_w / \rho}, \quad (3.7)$$

$$y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} U_P}{\mu}, \quad (3.8)$$

где U_P – осредненная скорость газа в точке P ; k_P – кинетическая энергия турбулентности в точке P ; τ_w – напряжение трения на стенке; ρ – плотность газа; y_P – расстояние точки P от стенки; μ – динамическая вязкость.

Уравнение (3.4) переноса кинетической энергии турбулентности k решается во всей расчетной области, включая пристеночные ячейки. Граничное условие для k , задаваемое на стенке, имеет вид

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0, \quad (3.9)$$

где n – локальная координата, нормальная к стенке.

Генерация кинетической энергии турбулентности G и скорость ее диссипации ε , которые входят в источниковый член уравнения (3.4), в пристеночных ячейках рассчитываются на основе гипотезы о локальном равновесии. При этом допущении генерация кинетической энергии турбулентности и скорость ее диссипации в пристеночном контрольном объеме полагаются одинаковыми. В результате уравнение (3.5) для ε в пристеночных ячейках не решается, вместо этого скорость диссипации кинетической энергии турбулентности определяется по формуле

$$\varepsilon_P = \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{k U_P}, \quad (3.10)$$

где k – эмпирическая постоянная.

3.2.3. Модель дисперсной фазы

В общем случае в рабочей зоне движется двухфазный поток, содержащий газ (воздух) и полидисперсный водяной аэрозоль. Так как объемная концентрация водяных капель в потоке невелика, можно рассматривать движение невзаимодействующих капель различных размеров в отдельности.

В отношении дисперсной фазы принимаем следующие основные допущения:

- дисперсная фаза представляет собой полностью распыленный факел жидкости (воды), состоящий из конечного множества испаряющихся сферических капель различных диаметров;
- всеми силами, действующими на каплю, кроме сил тяжести и аэродинамического сопротивления, пренебрегаем;
- процессами вторичного дробления и коагуляции капель пренебрегаем.

При сделанных выше допущениях поведение дисперсной фазы (капель воды) удобно рассматривать в лагранжевом описании. Для распыленных жидкостей общепринятым распределением капель по размерам

считается выражение Розина – Раммлера. Весь диапазон начальных размеров капель делится на определенное число дискретных интервалов; каждый из них представляется средним начальным диаметром, для которого выполняется траекторный расчет. При этом каждая моделируемая капля фактически представляет собой «пакет» капель с одинаковыми траекториями.

Если распределение капель по размерам описывается формулой Розина–Раммлера, то массовая доля капель с диаметром, большим d , определяется по формуле

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n}, \quad (3.11)$$

где \bar{d} – средний медианный диаметр капель в распыле; n – параметр распределения.

Движение частицы дисперсной фазы (капли) описывается вторым законом Ньютона. При сделанных выше допущениях уравнение движения одиночной капли в векторной форме имеет вид

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{G} + \vec{F}_R, \quad (3.12)$$

где m_p – масса капли; \vec{u}_p – скорость капли; t – время; \vec{G} – сила тяжести, определяемая выражением

$$\vec{G} = m_p \vec{g}, \quad (3.13)$$

где \vec{g} – ускорение свободного падения; \vec{F}_R – сила аэродинамического сопротивления капли, определяемая выражением

$$\vec{F} = 0,5C_R A_p \rho |\vec{u} - \vec{u}_p| (\vec{u} - \vec{u}_p), \quad (3.14)$$

где C_R – коэффициент аэродинамического сопротивления капли; A_p – площадь миделева сечения капли; ρ – плотность газа; \vec{u} – скорость газа.

Подставляя выражения (3.13) и (3.14) в уравнение (3.12), учитывая, что масса сферической капли и площадь ее миделева сечения определяются выражениями

$$m_p = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6}, \quad (3.15)$$

$$A_p = 0,25\pi d_p^2, \quad (3.16)$$

а также спроецировав векторы обеих частей уравнения (3.12) на оси неподвижной декартовой системы координат, получим систему уравнений движения капли в виде

$$\frac{du_{pj}}{dt} = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} g_j - \frac{3\rho C_R}{4\rho_p d_p} (u_{pj} - u_j) \left[\sum_j (u_{pj} - u_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.17)$$

где $j = 1, 2, 3$.

Для расчета траектории капли систему (3.17) дополняем следующим очевидным уравнением:

$$\frac{dx_{pj}}{dt} = u_{pj}, \quad (3.18)$$

где $j = 1, 2, 3$, x_{pj} – декартовы координаты капли.

При характерных для систем пылеподавления умеренных значениях относительных скоростей движения капель, когда сжимаемостью можно пренебречь, коэффициент аэродинамического сопротивления C_R сферической капли является однозначной функцией относительного числа Рейнольдса, определяемого как

$$Re_p = \frac{\rho d_p |\vec{u} - \vec{u}_p|}{\mu}, \quad (3.19)$$

где d_p – диаметр капли; μ – динамическая вязкость газа.

Для аппроксимации зависимости $C_R(Re_p)$ использована эмпирическая формула Чжена–Тризека [117]

$$C_R = \frac{24}{Re_p} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re_p}} + 0,27. \quad (3.20)$$

Таким образом, поведение одиночной неиспаряющейся капли в известном газодинамическом поле описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) (3.17) – (3.18). В этой системе искомыми функциями являются проекции абсолютной скорости капли u_{pj} и ее координаты x_{pj} . Остальные величины служат параметрами. Часть из этих параметров функционально связана с независимыми переменными. Поэтому для замыкания системы ее необходимо дополнить алгебраическими соотношениями (3.11), (3.19), (3.20).

Начальные условия. Для численного решения системы ОДУ (3.17) – (3.18) необходимо задать начальные условия, то есть значения независимых переменных в начальный момент времени $t = 0$ u_{pj0} и x_{pj0} .

При моделировании орошения бранспойтом полагалось, что капли стартуют из точки распада компактной струи, расположенной на расстоянии от насадка

$$r = \psi h_{\text{кап}}, \quad (3.21)$$

где ψ – отношение высоты поднятия отдельных капель $h_{\text{кап}}$ к высоте поднятия компактной струи $h_{\text{ком}}$, определяемое по табл. 20.10 [259]; $h_{\text{кап}}$ – высота поднятия отдельных капель, определяемая по формуле [259]

$$h_{\text{кап}} = \frac{h}{1 + \psi_1 h}, \quad (3.22)$$

где h – полный напор в начале насадка; ψ_1 – эмпирический коэффициент, зависящий от формы насадка [259].

Начальная скорость капель полагалась равной локальной скорости жидкости в компактной струе:

$$u_{p0} = v = \varphi \sqrt{2gh}, \quad (3.23)$$

где φ – коэффициент скорости ($\varphi = 0,95$).

Направление вектора начальной скорости капель определялось по значению первой производной уравнения траектории компактной струи, истекающей из насадка, в точке ее распада:

$$y = x \operatorname{tg} \Theta - \frac{gx^2}{2v^2 \cos^2 \Theta}, \quad (3.24)$$

где Θ – угол наклона насадка к горизонту; x и y – горизонтальная и вертикальная декартовы координаты соответственно.

При моделировании орошения атомайзером координаты точек вылета капель x_{pjo} выбирались в центрах граней расчетных ячеек, принадлежащих выходному сечению атомайзера. Начальная скорость капель полагалась равной локальной скорости газа в выходном сечении атомайзера: $u_{pjo} = u_j$.

Во всех случаях диаметры капель d_p задавались гистограммой начального распределения капель по размерам, построенной с помощью уравнения (3.11).

3.2.4. Модель межфазного взаимодействия

Взаимодействие между фазами учитывается с помощью дискретной модели «частица – источник в ячейке», в соответствии с которой присутствие капли в потоке проявляется через дополнительный источник в уравнении сохранения количества движения сплошной фазы [119]. Во время расчета траекторий капель отслеживается количество движения, приобретаемое или теряемое «пакетом» капель, следующих вдоль данной траектории. Затем эти значения включаются в расчет газовой фазы в виде источникового члена S_{fi} в уравнении (3.2). Таким образом, поскольку газовая фаза уже оказывает воздействие на дисперсную фазу через уравнения (3.17) – (3.18), то принимается во внимание и обратное влияние дисперсной фазы на континуум. Это двухстороннее взаимодействие учитывается поочередным решением уравнений дисперсной и непрерывной фаз до тех пор, пока решения обеих фаз не установятся. Схема такой модели межфазного взаимодействия показана на рис. 3.3.

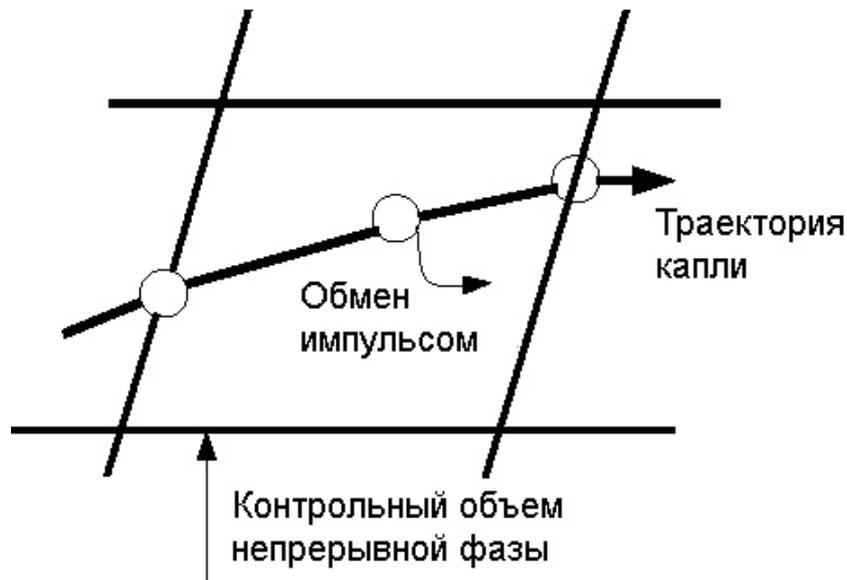


Рис. 3.3. Схема межфазного взаимодействия

Перенос количества движения от непрерывной фазы к дисперсной фазе вычисляется путем оценки изменения количества движения капли при ее прохождении через каждый контрольный объем геометрической модели рабочей зоны.

Это изменение количества движения рассчитывается как

$$\Delta S_{fi} = \sum \left(\frac{2\mu C_R Re_p}{3\rho_p d_p^2} (u_{pi} - u_i) \dot{m}_p \Delta t \right), \quad (3.25)$$

где \dot{m}_p – массовый расход капель; Δt – шаг по времени.

3.2.5. Расчетная область и расчетная сетка

При моделировании ВЗ, создаваемой атомайзером, расчетная область представляла собой четверть шара диаметром 400 м, которая соответствовала ограниченному подстилающей поверхностью зеркально симметричному фрагменту атмосферы, окружающей сопло диаметром 0,598 м, с вычтенным из него соплом (рис. 3.4).

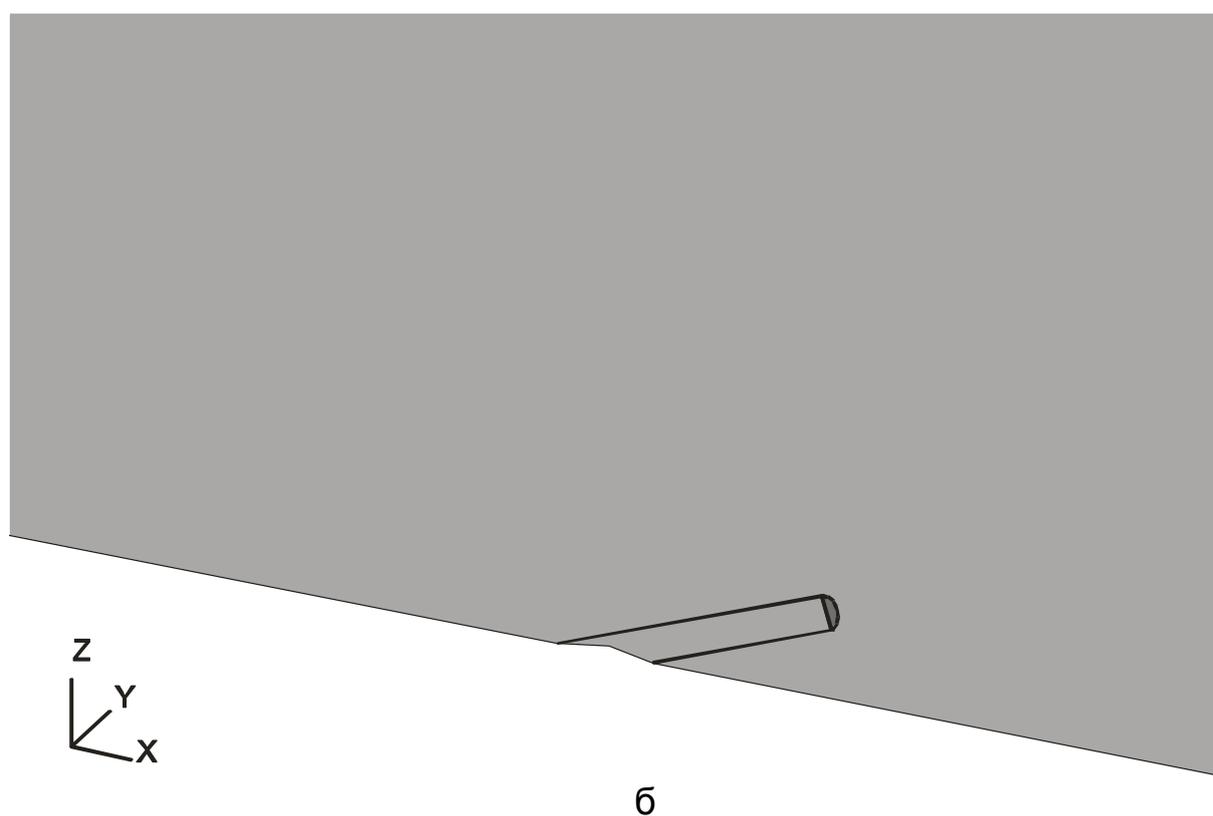
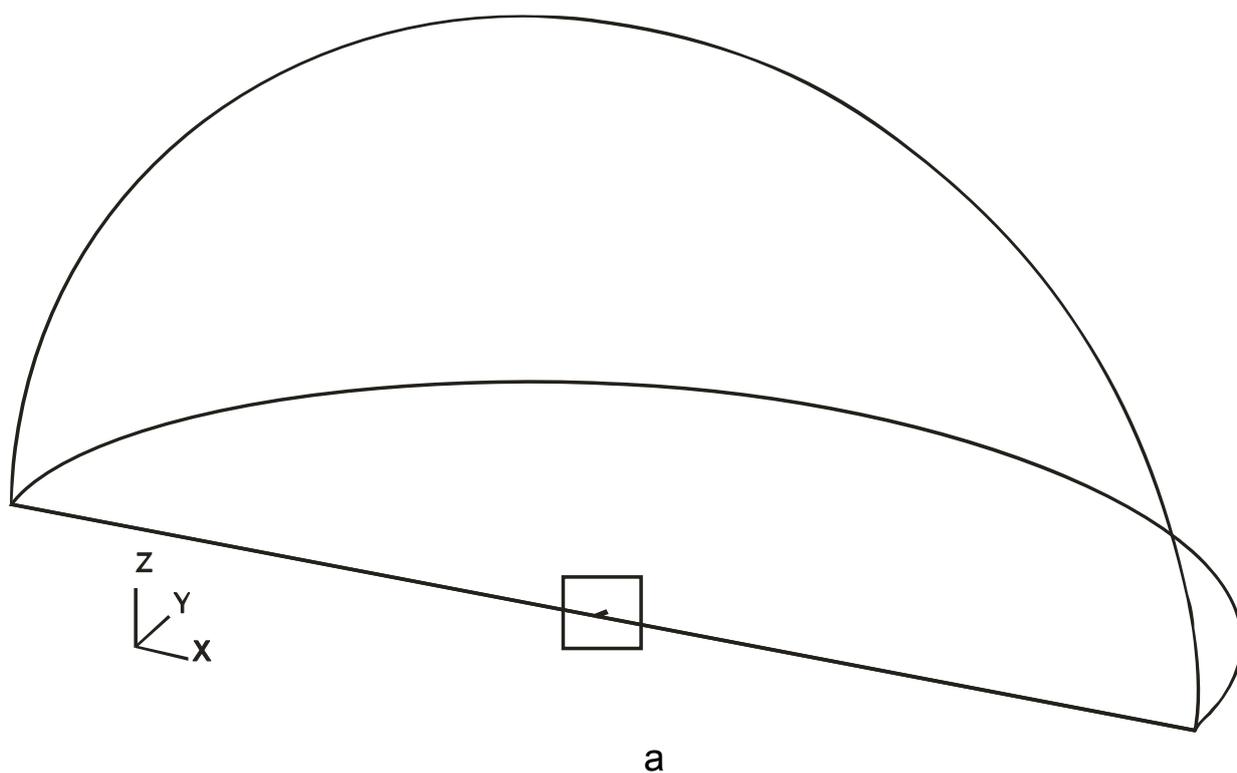


Рис. 3.4. Расчетная область (угол наклона сопла 20°): а – вся расчетная область; б – фрагмент

Расчетная область покрывалась неравномерной расчетной сеткой, включавшей около 50 тысяч тетраэдрических ячеек (рис. 3.5).

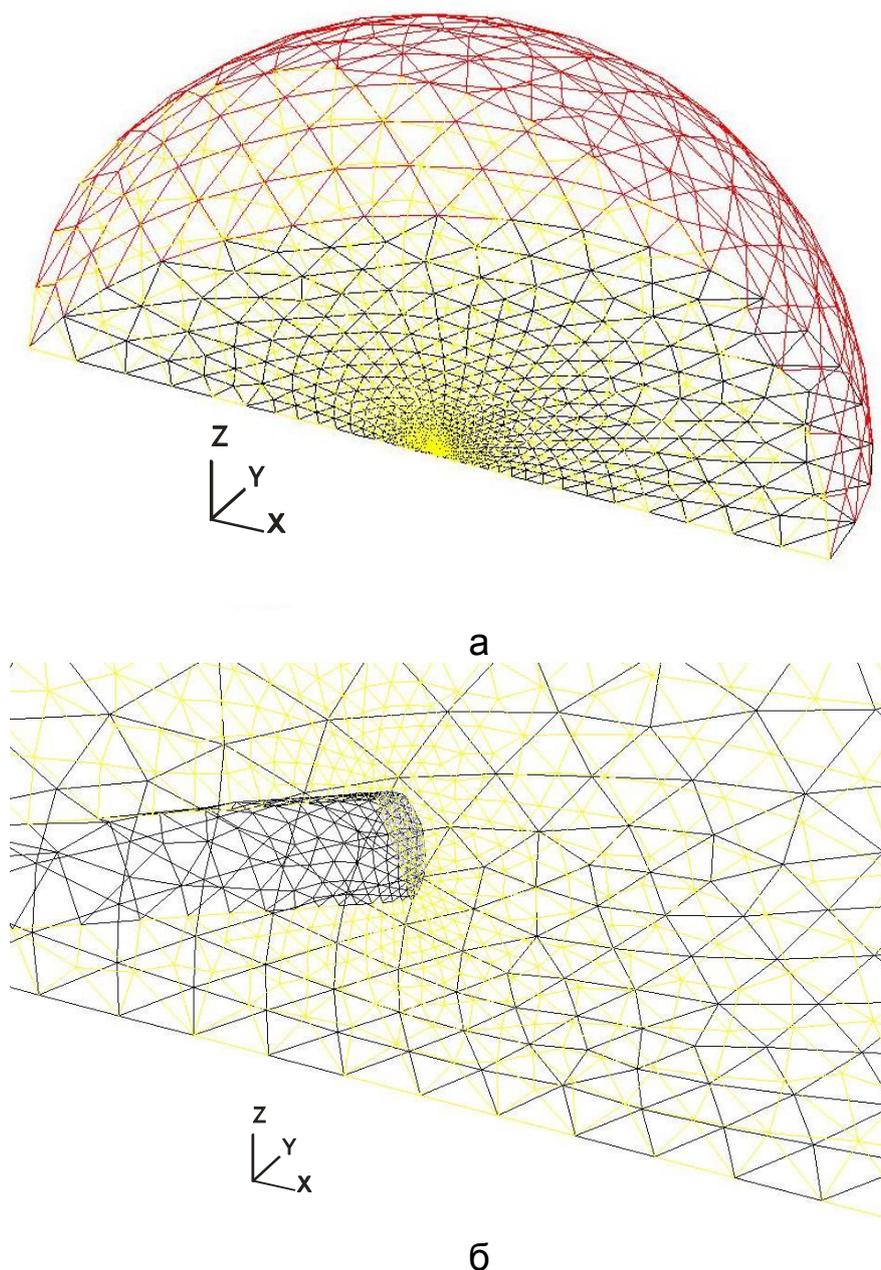


Рис. 3.5. Расчетная сетка (угол наклона сопла – 20°):
 а – вся расчетная область; б – фрагмент

3.3. Исследование процесса постановки мелкодисперсной водяной завесы численным методом

3.3.1. Метод численного интегрирования уравнений газовой фазы

Численное интегрирование системы ДУЧП (3.1) – (3.4) с заданными граничными условиями предусматривает их дискретизацию. Дискретизация уравнений по пространству выполнялась методом контрольных объемов [259] на неструктурированной (неупорядоченной) расчетной сетке, составленной из тетраэдрических элементарных объемов-ячеек.

Рассмотрим алгоритм дискретизации управляющих уравнений (3.1) – (3.4) на примере обобщенного уравнения переноса произвольной скалярной величины ϕ , записанного в интегральной форме для произвольного контрольного объема V :

$$\iint \rho \phi \vec{u} \cdot d\vec{A} = \iint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \iiint_V S_{\phi} dV, \quad (3.26)$$

где ρ – плотность газа; \vec{u} – вектор скорости газа; \vec{A} – вектор площади поверхности; Γ_{ϕ} – эффективный коэффициент диффузии для ϕ ; $\nabla \phi$ – градиент ϕ ; S_{ϕ} – член типа источника.

Уравнение (3.26) применяется к каждому контрольному объему – ячейке расчетной области.

Дискретизация уравнения (3.26) на такой ячейке дает

$$\sum_f^{N_f} \rho_f \vec{u}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_f} \Gamma_{\phi} (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V, \quad (3.27)$$

где N_f – количество граней, ограничивающих ячейку; $\rho_f \vec{u}_f \cdot \vec{A}_f$ – поток массы через грань f ; \vec{A}_f – площадь грани f ; ϕ_f – величина, переносимая конвекцией через грань f ; $(\nabla \phi)_n$ – величина $\nabla \phi$, нормальная к грани f ; V – объем ячейки.

Дискретные значения скаляра ϕ определяются в центрах контрольных ячеек. Значения ϕ_f на гранях ячеек, необходимые для вычисления конвективных членов в уравнении (3.27), определяются путем интерполяции значений ϕ в центрах контрольных ячеек. Это осуществляется с помощью односторонней разностной схемы «против потока», в которой ϕ_f вычисляется по ϕ в центре ячейки, лежащей выше по течению относительно направления нормальной скорости u_n в уравнении (3.27). Для построения схемы первого порядка точности значения переменных принимаются постоянными в объемах, разделенных гранью. Для построения схем более высокого порядка точности переменные экстраполируются на поверхности ячеек с применением разложения в ряд Тейлора по значению в центре ячейки:

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \cdot \vec{r}, \quad (3.28)$$

где ϕ – величина переменной в центре ячейки; $\nabla \phi$ – градиент переменной в ячейке, лежащей выше по потоку; \vec{r} – вектор, начало которого находится в центре ячейки, а конец – в центре грани.

Для определения градиента $\nabla \phi$ данные вначале интерполируются на узлы, а затем по теореме Остроградского–Гаусса определяется градиент

$$\nabla \phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_f} \phi_f \vec{A}_f, \quad (3.29)$$

где $\bar{\phi}_f$ – средняя величина по двум смежным ячейкам, разделенным гранью f .

Для аппроксимации диффузионных членов в уравнении (3.27) используются центральные разности второго порядка точности:

$$\phi_{fCD} = \frac{1}{2}(\phi_0 + \phi_1) + \frac{1}{2}(\nabla\phi_{r0} \cdot \vec{r}_0 + \nabla\phi_{r1} \cdot \vec{r}_1), \quad (3.30)$$

где индексы «0» и «1» относятся к смежным ячейкам с общей гранью f ; $\nabla\phi_{r0}$ и $\nabla\phi_{r1}$ – восстановленные описанным выше способом градиенты переменной ϕ в ячейках 0 и 1 соответственно; \vec{r} – вектор, начало которого находится в центре ячейки, а конец – в центре грани.

Дискретный аналог (3.27) содержит наряду с неизвестной переменной ϕ в центре ячейки также неизвестные величины в соседних ячейках. В общем случае уравнение является нелинейным. Линеаризованная форма уравнения (3.27) может быть представлена как

$$a_p\phi = \sum_{nb} a_{nb}\phi_{nb} + b, \quad (3.31)$$

где индекс «nb» относится к центрам соседних ячеек; a_p и a_{nb} – линеаризованные коэффициенты для ϕ и ϕ_{nb} соответственно.

Число соседних ячеек равно числу граней ячейки. Аналогичные уравнения можно записать для каждой ячейки расчетной сетки. В результате получается система алгебраических квазилинейных уравнений вида

$$AX = B, \quad (3.32)$$

где A – матрица коэффициентов алгебраических уравнений; X – вектор неизвестных; B – вектор правых частей.

Система (3.32) решается итерационным методом Гаусса–Зейделя.

Дискретный аналог (3.31) в действительности является нелинейным, так как коэффициенты a и b меняются по итерациям. Поэтому для обеспечения сходимости накладывается дополнительное условие, заключающееся в том, что a и b должны мало меняться от итерации к итерации. Этому условию можно удовлетворить с помощью метода нижней релаксации:

$$\phi = \phi^{n-1} + \alpha_n(\phi^n - \phi^{n-1}), \quad (3.33)$$

где n – номер итерации; $\alpha_n = 0 \dots 1$ – параметр нижней релаксации.

Описанная выше схема дискретизации уравнения переноса произвольной скалярной величины ϕ применяется также для дискретизации уравнений сохранения количества движения и уравнения неразрывности.

Например, уравнение для x -компоненты количества движения можно получить, полагая $\phi = u_1$:

$$a_p u_1 = \sum_{nb}^{N_{nb}} a_{nb} u_{1nb} + \sum_f^{N_f} p_f A_f \cdot \hat{i} + S, \quad (3.34)$$

где индекс «P» относится к центру ячейки, «f» – к граням ячейки, «nb» – к центрам соседних ячеек; \hat{i} – единичная матрица.

Дискретный аналог уравнения неразрывности имеет вид

$$\sum_f^{N_f} J_f A_f = \Delta S_m, \quad (3.35)$$

где $J_f = \rho u_n$ – поток массы через грань f .

Поток массы через грань J_f определяется как

$$J_f = \widehat{J}_f + d_f(p_{c0} - p_{c1}), \quad (3.36)$$

где p_{c0} и p_{c1} – давления в двух ячейках, расположенных по разные стороны от грани f , а \widehat{J}_f содержит влияние скоростей в этих ячейках.

Член d_f является функцией от \bar{a}_p – среднего по двум ячейкам, расположенным по разные стороны от грани f , значения коэффициента a_p в уравнении сохранения количества движения (3.34).

Если поле давления и потоки массы на гранях известны, то уравнение (3.34) может быть решено способом, аналогичным использованному выше для уравнения (3.27), в результате чего можно получить поле скорости. Однако поле давления и потоки массы на гранях заранее не известны и должны быть получены в результате решения.

Уравнения сохранения количества движения и неразрывности решаются последовательно. В этой последовательной процедуре уравнение сохранения количества движения используется как уравнение для давления. Однако для несжимаемых течений (в пределе малых чисел Маха) давление не появляется явно в уравнении неразрывности (3.35), поскольку плотность явно не зависит от давления. Для введения давления в уравнение неразрывности используется процедура коррекции давления SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) [326], в которой связь между давлением и скоростью достигается путем использования уравнения (3.34) для решения уравнения при давлении, получаемом из дискретного аналога (3.35) уравнения неразрывности. Алгоритм SIMPLE использует соотношение между скоростью и поправками к давлению для навязывания условия сохранения массы и получения поля давления. Если уравнение сохранения количества движения решается по предварительному полю давления p^* , получающийся в результате поток на грани J_f^* , вычисленный по уравнению (3.36)

$$J_f^* = \widehat{J}_f^* + d_f(p_{c0}^* - p_{c1}^*), \quad (3.37)$$

не удовлетворяет уравнению неразрывности. Для устранения этого к потоку J_f^* прибавляется поправка J_f' , такая, чтобы скорректированный поток J_f удовлетворял уравнению неразрывности:

$$J_f = J_f^* + J_f'. \quad (3.38)$$

Используется следующее выражение для поправки J_f' :

$$J_f = d_f(p'_{c0} - p'_{c1}), \quad (3.39)$$

где p' – поправка к давлению в ячейке.

Подстановка выражений (3.38) и (3.39) в дискретный аналог (3.35) приводит к следующему выражению p' :

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b, \quad (3.40)$$

где источниковый член b представляет собой массовый расход газа через ячейку:

$$b = \sum_f^{N_f} J_f^* A_f. \quad (3.41)$$

Уравнение для поправки к давлению (3.40) решается итерационным методом Гаусса–Зейделя. После получения решения давление в ячейке и поток через грань корректируются по формулам

$$p = p^* + \alpha_p p', \quad (3.42)$$

$$J_f = J_f^* + d_f(p'_{c0} - p'_{c1}), \quad (3.43)$$

где α_p – коэффициент нижней релаксации для давления.

Скорректированный поток J_f точно удовлетворяет уравнению неразрывности на каждой итерации.

3.3.2. Обеспечение устойчивости, сходимости и точности численного решения

Устойчивость численного решения может быть обеспечена применением метода нижней релаксации независимых переменных (см. уравнение (3.33)).

Количество итераций, необходимых для решения стационарных задач аэрогидродинамики, определяется как алгоритмом разностной схемы, так и критерием оценки сходимости решения. Используемые исследователями критерии сходимости решения можно классифицировать следующим образом:

1. Определение невязки для каждого решаемого дифференциального уравнения. В этом случае, как правило, для достижения сходимости всего решения необходимо для каждого разностного уравнения обеспечить заданный уровень невязки.

2. Интегральная невязка. В данном случае для всех уравнений определяется единый критерий, позволяющий анализировать сходимость решения.

Для оценки сходимости предлагается применять интегральный критерий относительно вектора консервативных переменных.

Условие сходимости решения можно представить в следующем виде:

$$\sqrt{\frac{\sum R_i^2}{V^2}} \leq \varepsilon, \quad (3.44)$$

где R_i – невязки для разностных уравнений, моделирующих перенос независимых переменных; V – объем расчетной ячейки; ε – критерий сходимости.

Численное решение может считаться сошедшимся, если выполняется одно из следующих условий:

- выполняется условие (3.44);
- решение больше не изменяется при продолжении итераций.

В качестве альтернативного критерия сходимости решения задач может приниматься пульсация значений отношения массового расхода во входном сечении к выходному.

Точность численного решения может оцениваться по степени выполнения критериев сходимости, степени независимости решения от размера расчетной сетки и степени качественного соответствия результатов расчета известным физическим представлениям.

Сеточная независимость решения может оцениваться путем сравнения численных результатов, полученных на нескольких расчетных сетках, различающихся количеством расчетных ячеек.

Таким образом, используя данный расчетный метод, можно определить параметры газа в любой точке расчетной области.

3.3.3. Метод численного интегрирования уравнений дисперсной фазы

Численное интегрирование системы ОДУ (3.17) – (3.18) с заданными начальными условиями выполнялось методом Рунге–Кутты 4-го порядка с переменным шагом, выбираемым по формуле

$$\Delta t = \frac{\tau_a}{\chi}, \quad (3.45)$$

где χ – коэффициент «размельчения», задаваемый в зависимости от желаемой точности интегрирования; τ_a – время аэродинамической релаксации, определяемое выражением

$$\tau_a = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}. \quad (3.46)$$

3.4. Результаты численного моделирования процесса постановки мелкодисперсной водяной завесы

Исследовано 30 вариантов постановки ВЗ, различавшихся диаметром представительных капель D_k , углом подачи α и скоростью выдува капель $V_{к0}$ атомайзером (рис. 3.6 – 3.11, табл. 3.1).

Представительные капли подавались из четырех точек, принадлежащих выходной плоскости сопла атомайзера: три из них располагались на нижнем, верхнем и боковом краях сопла, четвертая – на оси сопла.

В табл. 3.1 сведены расчетные геометрические параметры ВЗ: максимальная высота завесы Z_{max} , максимальная дальность орошения подстиляющей поверхности X_{max} и протяженность пятна орошения ΔX для 30 рассчитанных вариантов.

Таблица 3.1

Расчетные параметры ВЗ

D_k , мкм	$V_{к0}$, м/с	α , град	Z_{max} , м	X_{max} , м	ΔX , м
10	0,5	10	3,3	62	32
10	0,5	20	12	95	12
10	0,5	30	27	87	14
10	0,5	45	63	90	21
10	0,5	60	88	69	16
10	1	10	4	106	46
10	1	20	23	>200	77
10	1	30	45	158	30
10	1	45	110	>200	>70
10	1	60	148	110	5
7	0,5	10	4	107	47
7	0,5	20	22	>200	>32
7	0,5	30	46	164	37
7	0,5	45	>110	>200	>60
7	0,5	60	152	110	5
7	1	10	5	190	72
7	1	20	32	>200	–
7	1	30	>80	>200	–
7	1	45	>130	>200	–
7	1	60	>170	>200	–
15	0,5	10	2	34	24
15	0,5	20	8	45	18
15	0,5	30	16	47	18
15	0,5	45	28	43	13
15	0,5	60	44	34	10
15	1	10	3	58	30
15	1	20	11	83	12
15	1	30	25	80	21
15	1	45	51	76	11
15	1	60	79	62	22

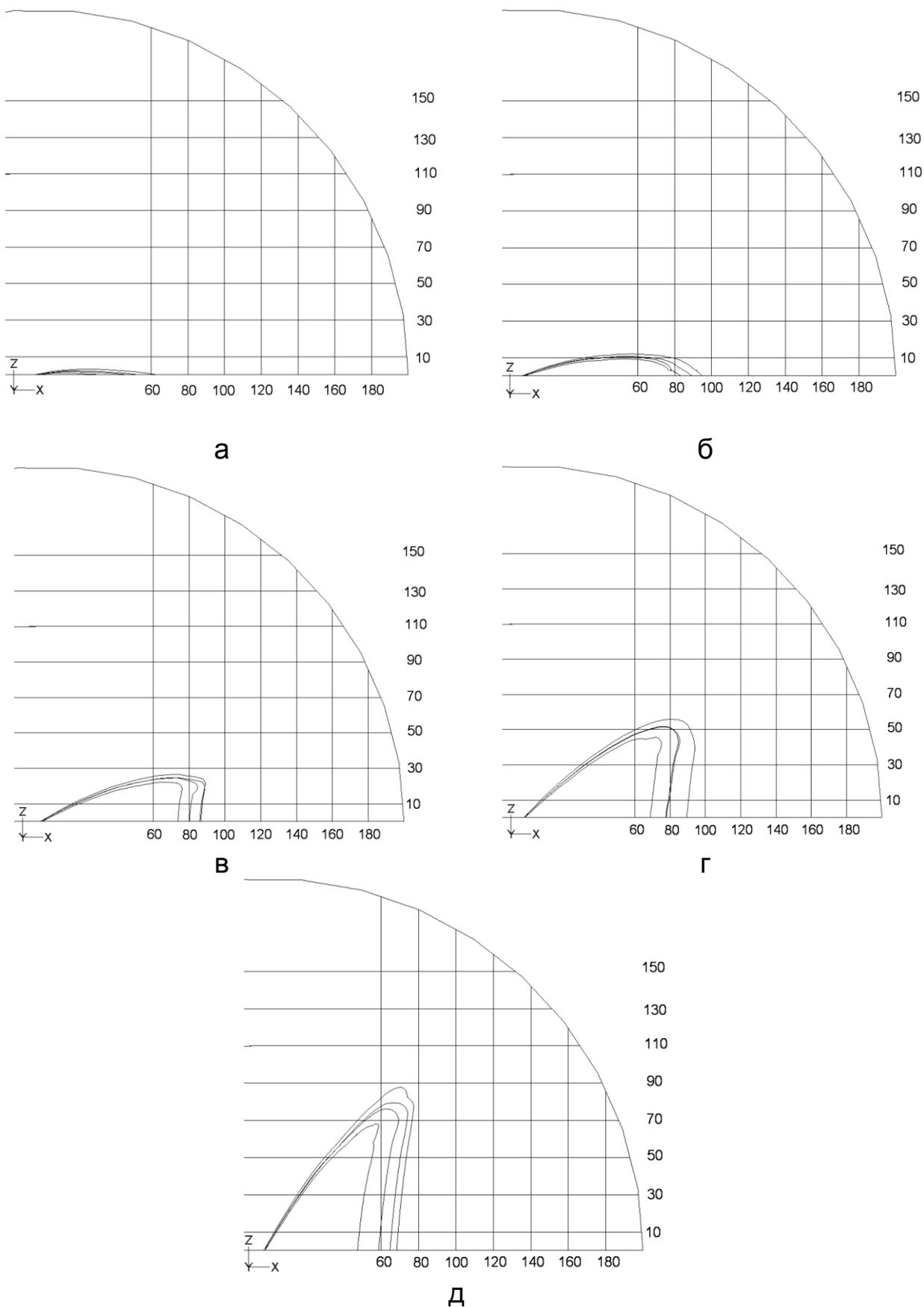


Рис. 3.6. Траектории представительных капель диаметром 10 мкм при скорости воздуха на выходе из сопла 0,5 м/с и различных углах наклона сопла: а – 10°; б – 20°; в – 30°; г – 45°; д – 60°

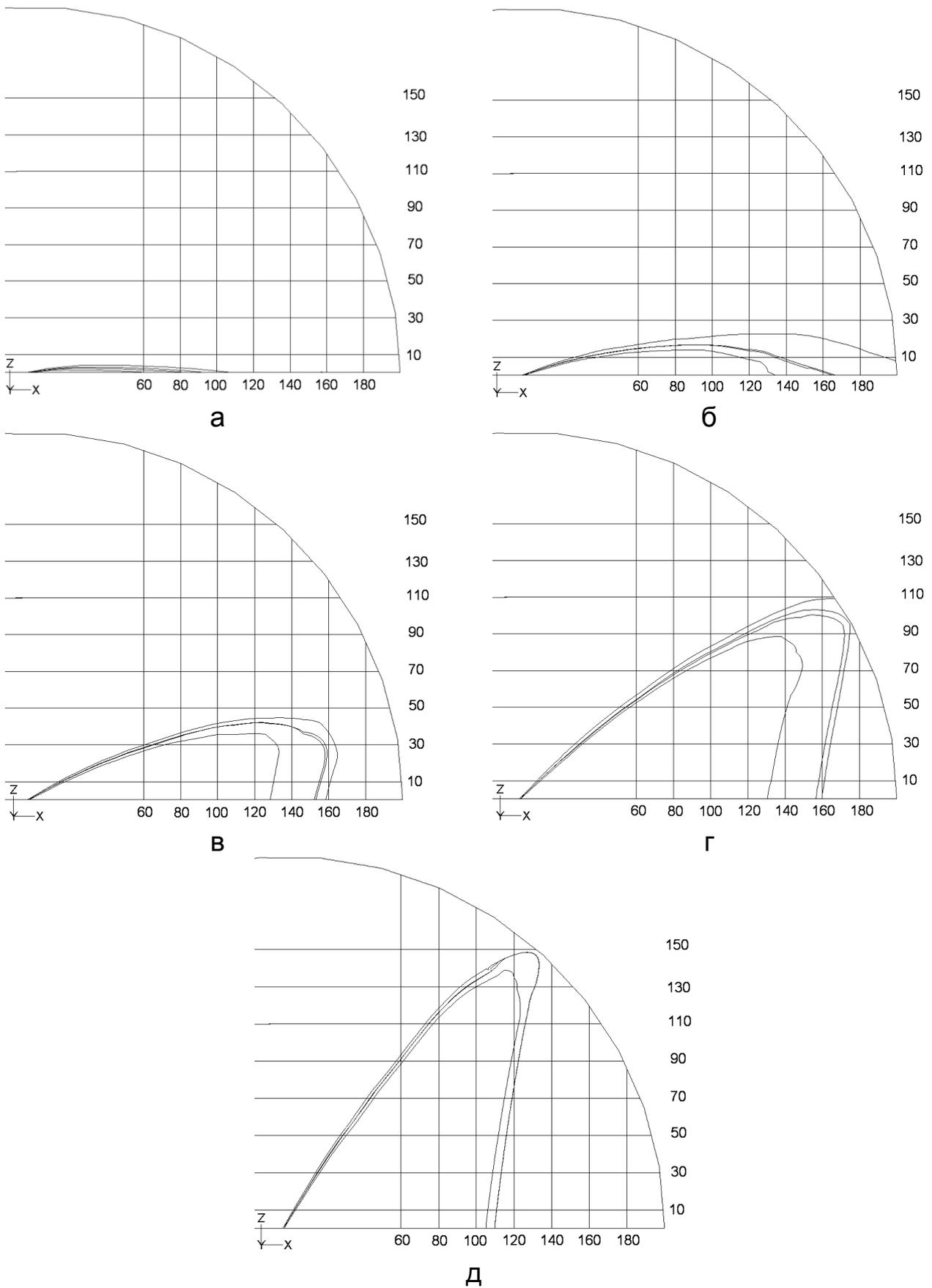


Рис. 3.7. Траектории представительных капель диаметром 10 мкм при скорости воздуха на выходе из сопла 1 м/с и различных углах наклона сопла: а – 10°; б – 20°; в – 30°; г – 45°; д – 60°

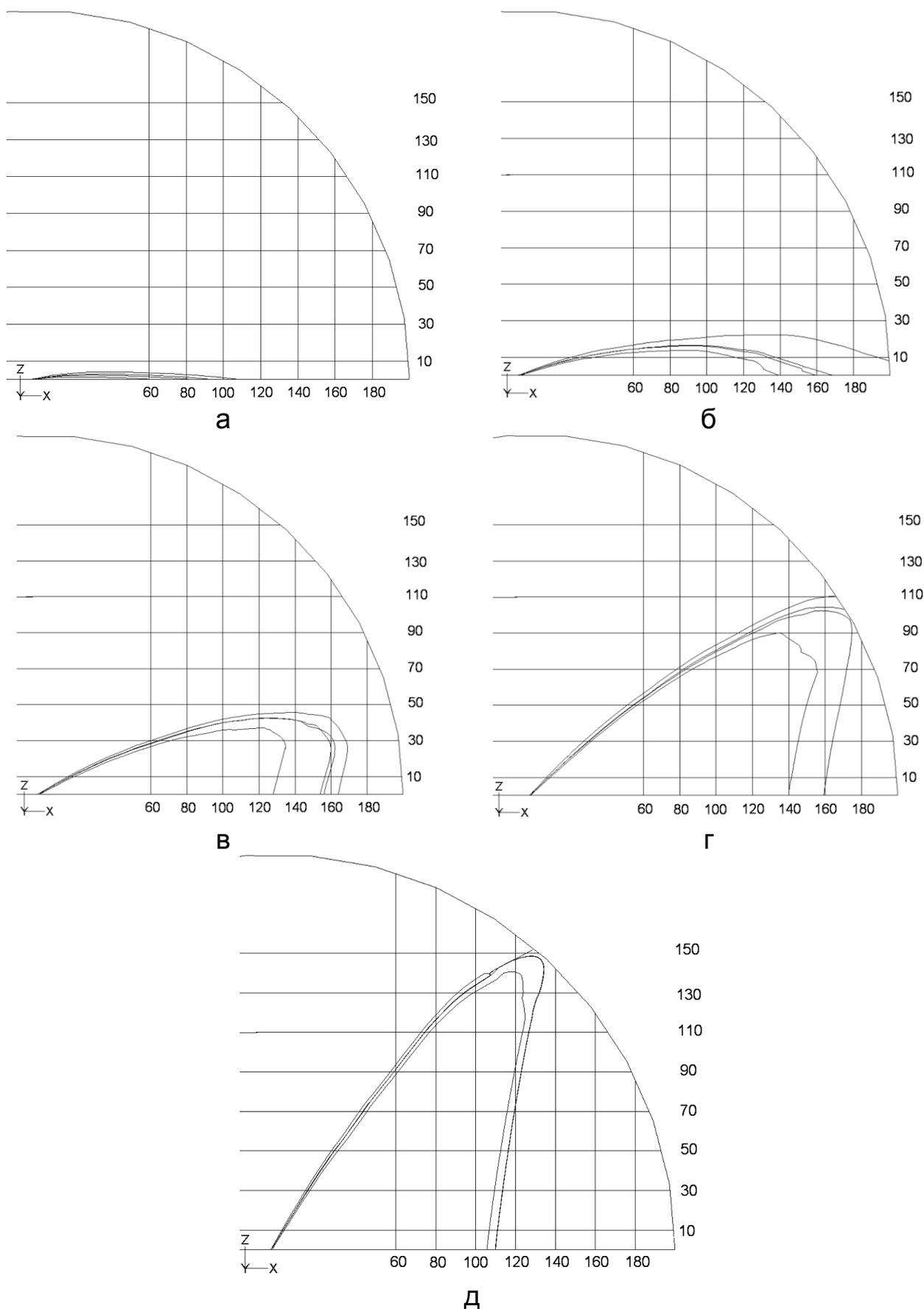


Рис. 3.8. Траектории представительных капель диаметром 7 мкм при скорости воздуха на выходе из сопла 0,5 м/с и различных углах наклона сопла: а – 10°; б – 20°; в – 30°; г – 45°; д – 60°

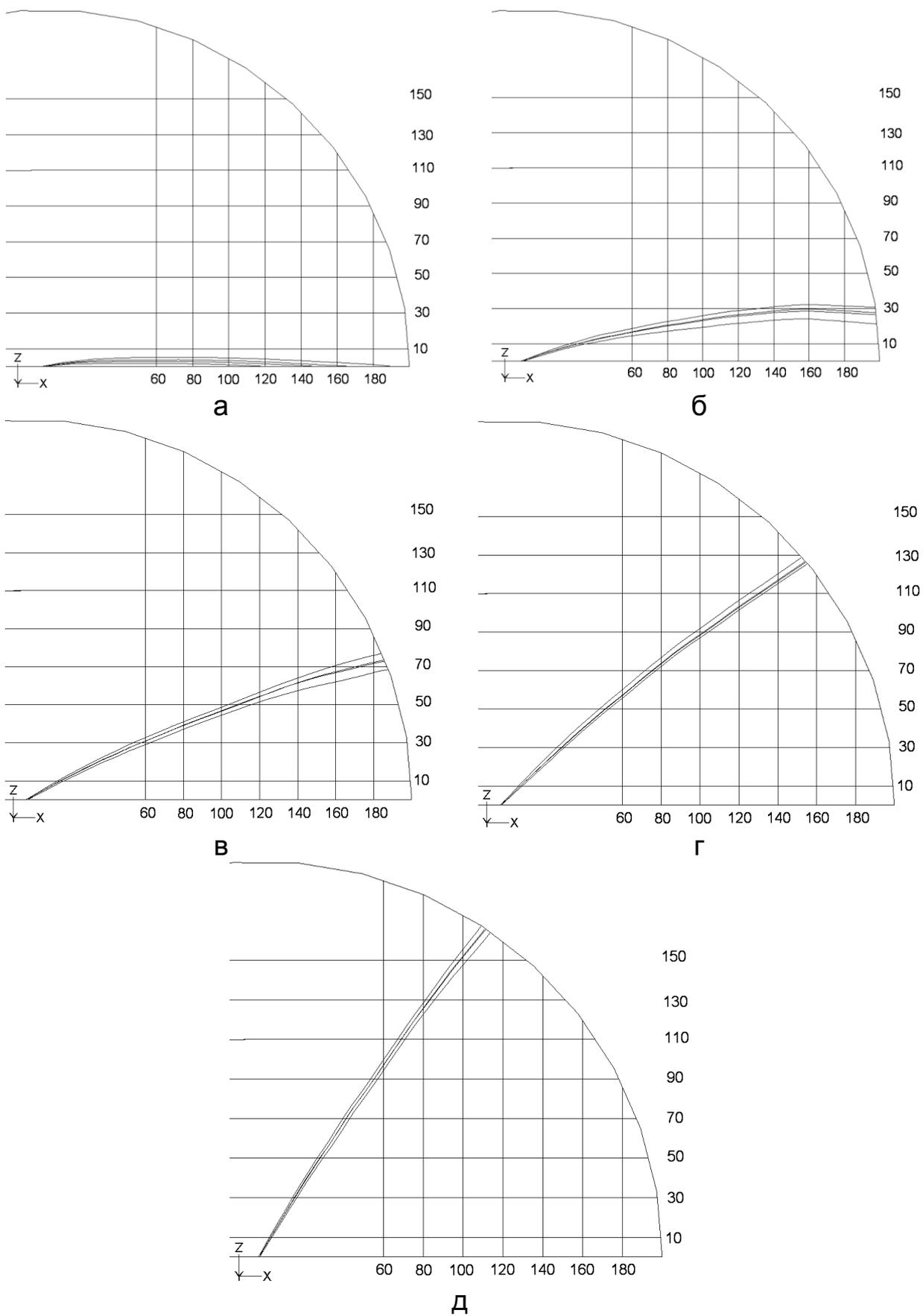


Рис. 3.9. Траектории представительных капель диаметром 7 мкм при скорости воздуха на выходе из сопла 1 м/с и различных углах наклона сопла: а – 10°; б – 20°; в – 30°; г – 45°; д – 60°

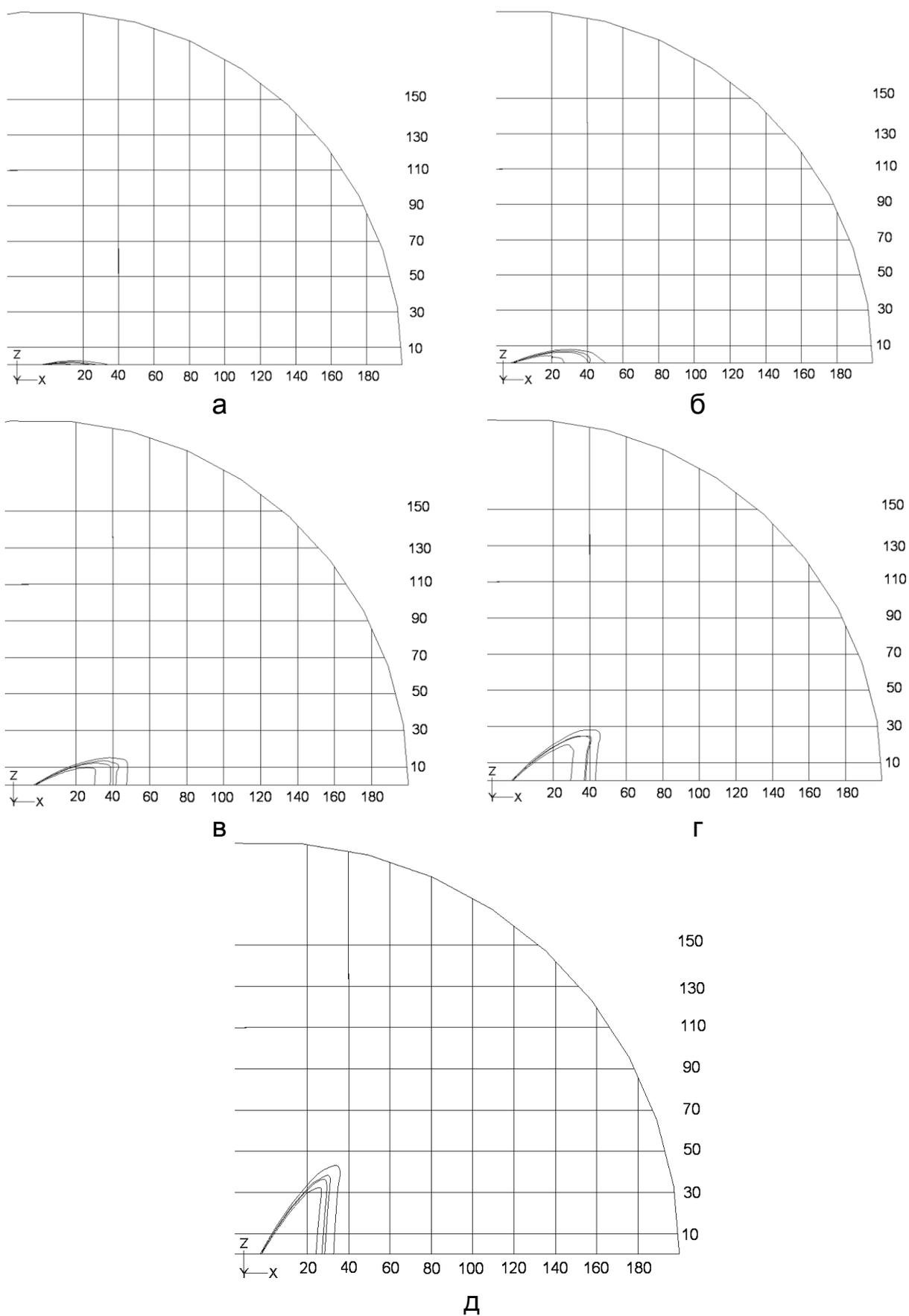


Рис. 3.10. Траектории представительных капель диаметром 15 мкм при скорости воздуха на выходе из сопла 0,5 м/с и различных углах наклона сопла: а – 10°; б – 20°; в – 30°; г – 45°; д – 60°

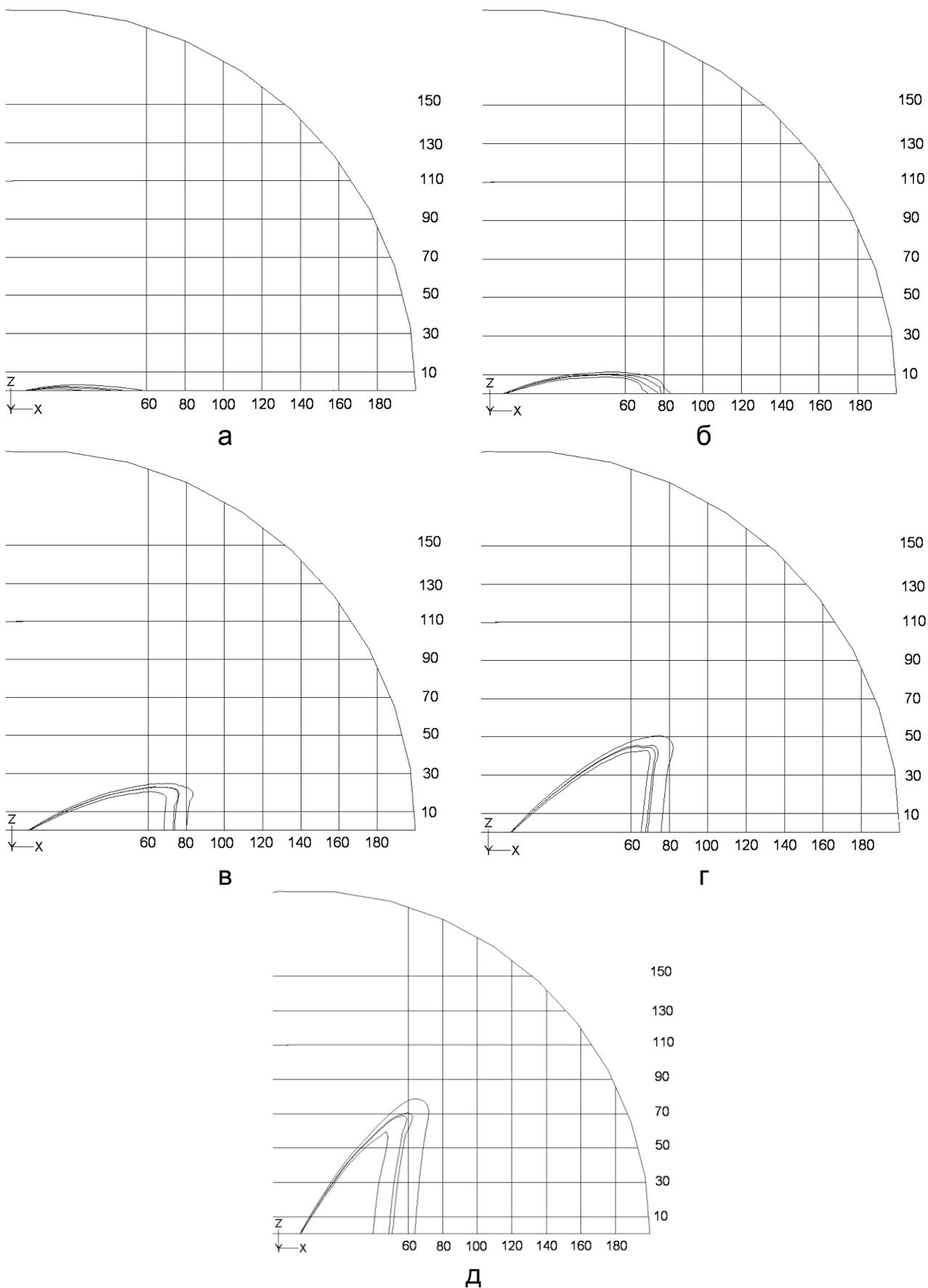


Рис. 3.11. Траектории представительных капель диаметром 15 мкм при скорости воздуха на выходе из сопла 1 м/с и различных углах наклона сопла: а – 10°; б – 20°; в – 30°; г – 45°; д – 60°

Из рис. 3.6 – 3.11 и табл. 3.1 видно следующее:

1. Капли, подаваемые под малыми углами α («настильно»), образуют ВЗ с малой максимальной высотой Z_{\max} , но с большими дальностью орошения подстилающей поверхности X_{\max} и протяженностью пятна орошения ΔX . Капли, подаваемые под большими углами α («навесно»), наоборот, образуют ВЗ с большой максимальной высотой Z_{\max} , но с малыми дальностью орошения подстилающей поверхности X_{\max} и протяженностью пятна орошения ΔX .

2. С увеличением скорости подачи капель $V_{к0}$ независимо от угла подачи капель α и их диаметра D_k максимальная высота ВЗ Z_{\max} и дальность орошения подстилающей поверхности X_{\max} монотонно возрастают.

3. С увеличением угла подачи капель α независимо от скорости подачи капель $V_{к0}$ и их диаметра D_k максимальная высота ВЗ Z_{\max} монотонно возрастает.

3. С увеличением угла подачи капель α дальность орошения подстилающей поверхности X_{\max} изменяется немонотонно. Вид функции $X_{\max}(\alpha)$ зависит от диаметра капель D_k : для мелких капель ($D_k = 7$ мкм и $D_k = 10$ мкм) функция $X_{\max}(\alpha)$ имеет два локальных максимума, тогда как для более крупных капель ($D_k = 15$ мкм) – один.

5. Для мелких капель ($D_k = 7$ мкм и $D_k = 10$ мкм) независимо от начальной скорости их подачи $V_{к0}$ и для крупных капель ($D_k = 15$ мкм), подаваемых с высокой начальной скоростью ($V_{к0} = 1$ м/с), с увеличением угла подачи капель α протяженность пятна орошения ΔX изменяется немонотонно, а именно имеет два локальных максимума. Для крупных капель ($D_k = 15$ мкм), подаваемых с низкой начальной скоростью ($V_{к0} = 0,5$ м/с) с увеличением угла подачи капель α протяженность пятна орошения ΔX монотонно уменьшается.

6. Для мелких капель ($D_k = 7$ мкм и $D_k = 10$ мкм), подаваемых под небольшими углами ($\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 20^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$), с увеличением скорости подачи капель $V_{к0}$ протяженность пятна орошения ΔX возрастает, тогда как капель, подаваемых под углом $\alpha = 60^\circ$, – уменьшается. Для крупных капель ($D_k = 15$ мкм) зависимость $\Delta X(V_{к0})$ немонотонна и имеет два локальных максимума.

3.5. Расчетная область и расчетная сетка для условий транспортирования мелкодисперсных капель в зону возникновения опасности природного или техногенного характера различного генезиса

При моделировании орошения зон возникновения опасностей природного или техногенного характера, имеющих размер до нескольких десятков метров (например, при образовании пылевого облака в процессе погрузки или разгрузки пылящих сыпучих материалов) в условиях штиля, встречного и спутного ветра расчетная область охватывала зеркально

симметричный фрагмент пространства, ограниченный штабелем насыпного груза и подпорными стенками и с прилегающим к нему участком атмосферы (рис. 3.12).

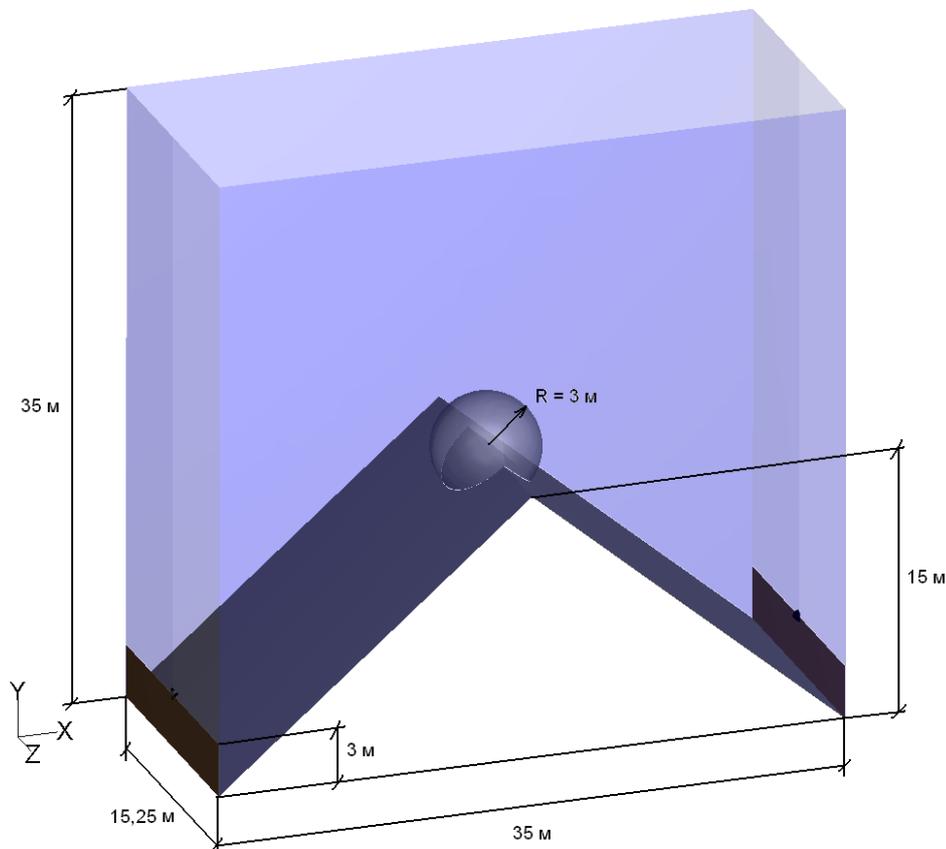


Рис. 3.12. Расчетная область для условий транспортирования мелкодисперсных капель в зону возникновения пылевого загрязнения

Задача транспортировки капель технологической жидкости в зону пылевыделения с помощью однофазных струйно-центробежных распылителей была решена Кобриной Н.В. при участии автора этой монографии [54, 106]. Этот же программный продукт был применен для решения задачи транспортировки капель технологической жидкости с помощью двухфазных распылителей и атомайзеров [43, 50]. Поэтому представим все варианты транспортировки мелкодисперсных капель в зону возникновения природной или техногенной опасности на примере подавления пыли с использованием различных распылителей – однофазных струйно-центробежных, двухфазных распылителей и атомайзеров.

Описанная выше расчетная область покрывалась неравномерной расчетной сеткой, включавшей в себя 304330 тетраэдрических ячеек (рис. 3.13).

При моделировании орошения в условиях бокового ветра протяженность расчетной области была увеличена до 35 м (на полную длину шта-

беля) в подветренную сторону от центра пылевого облака. В этом случае расчетная область включала в себя 1187702 тетраэдрических ячеек.

В обоих случаях границы пылевого облака моделировались проницаемой сферической поверхностью с центром, расположенным в вершине штабеля.

В дальнейшем рассматривался алгоритм дискретизации управляющих уравнений (3.1) – (3.4) на примере обобщенного уравнения переноса произвольной скалярной величины ϕ , записанного в интегральной форме для произвольного контрольного объема V с использованием зависимостей (3.26) – (3.43).

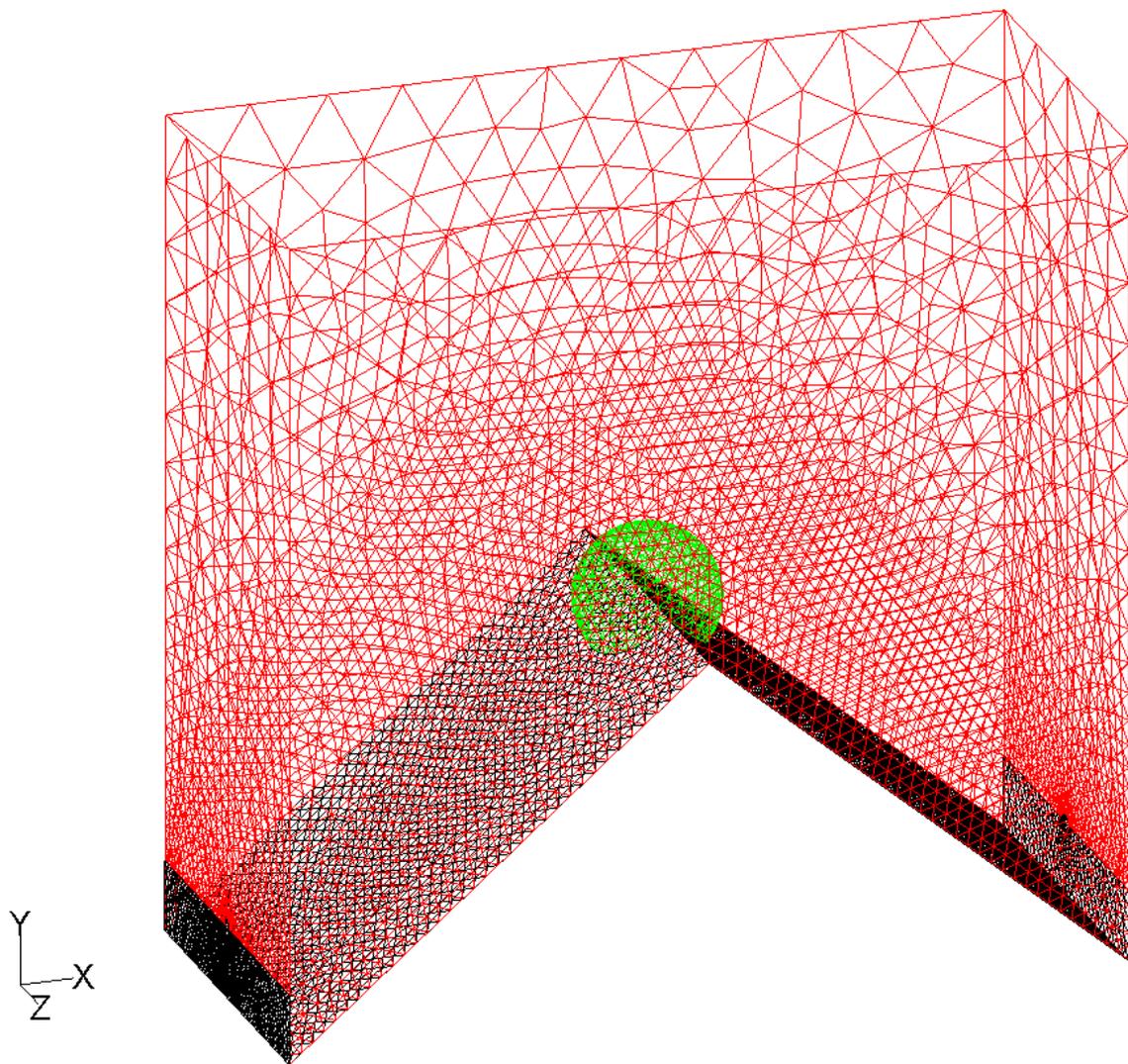


Рис. 3.13. Расчетная сетка для условий транспортирования мелкодисперсных капель в зону возникновения пылевого загрязнения

3.6. Результаты численного моделирования для условий транспортирования мелкодисперсных капель в зону возникновения пылевого загрязнения

3.6.1. Орошение брандспойтом

Исследовано несколько вариантов орошения пылевого облака брандспойтом, различавшихся углом подачи, полным напором, скоростью и направлением ветра.

Во всех вариантах использованы следующие параметры распределения капель по размерам.

Минимальный диаметр капель в распыле – 100 мкм.

Максимальный диаметр капель в распыле – 1500 мкм.

Средний медианный диаметр капель в распыле – 1000 мкм.

Показатель степени в формуле Розина–Раммлера – 2.

Гистограмма распределения капель по размерам, соответствующая указанным выше параметрам, показана на рис. 3.14.

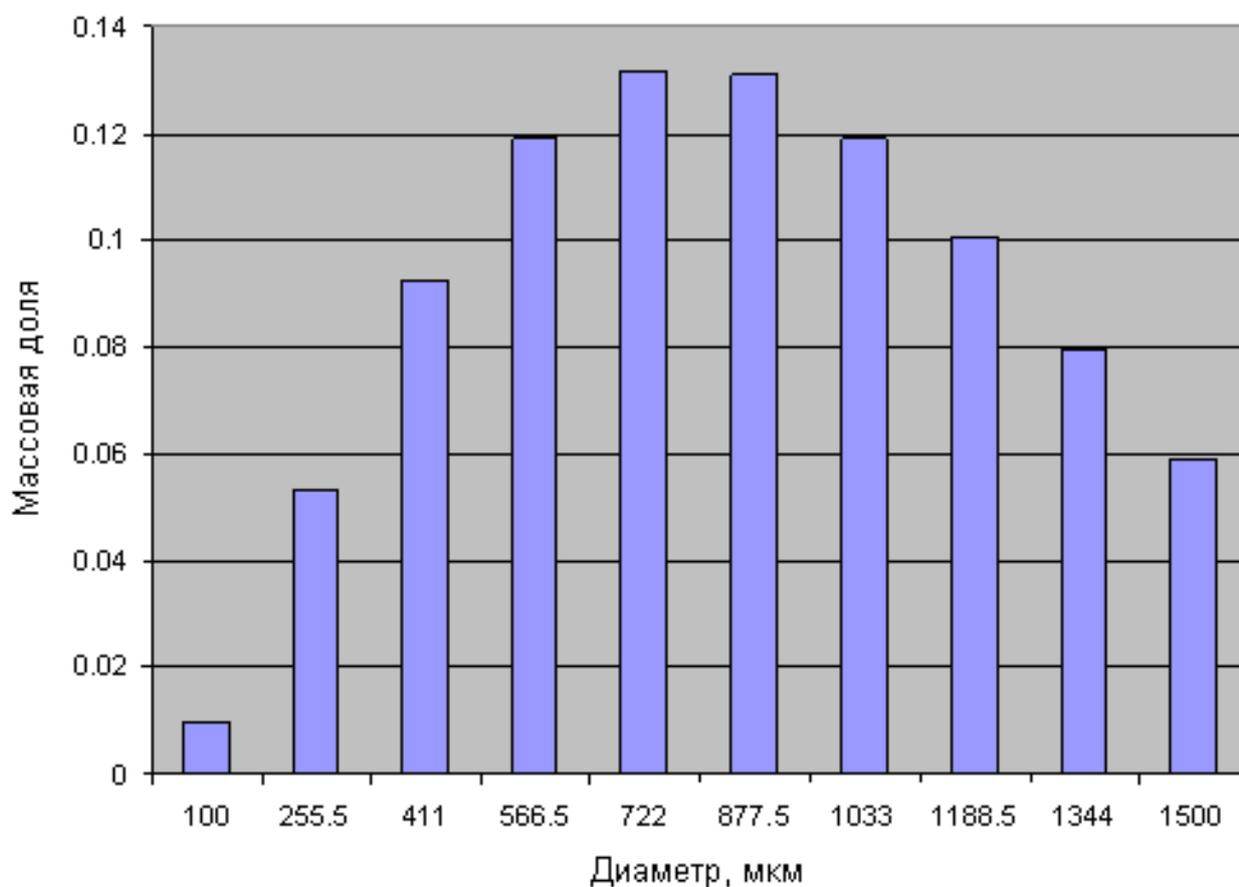


Рис. 3.14. Гистограмма распределения капель по размерам при орошении брандспойтом

В результате расчетов установлено, что при угле подачи 45° компактная струя достигает поверхности штабеля, не распадаясь. Поэтому для дальнейшего анализа были отобраны четыре варианта с углом подачи 60° (табл. 3.2, рис. 3.15 – 3.20).

Таблица 3.2

Варианты орошения пылевого облака брандспойтом

Вариант	Угол, град	Напор, м	Ветер	
			Скорость, м/с	Направление
1	60	40	0	–
2	60	25	3	спутный
3	60	40	3	встречный
4	60	40	3	боковой

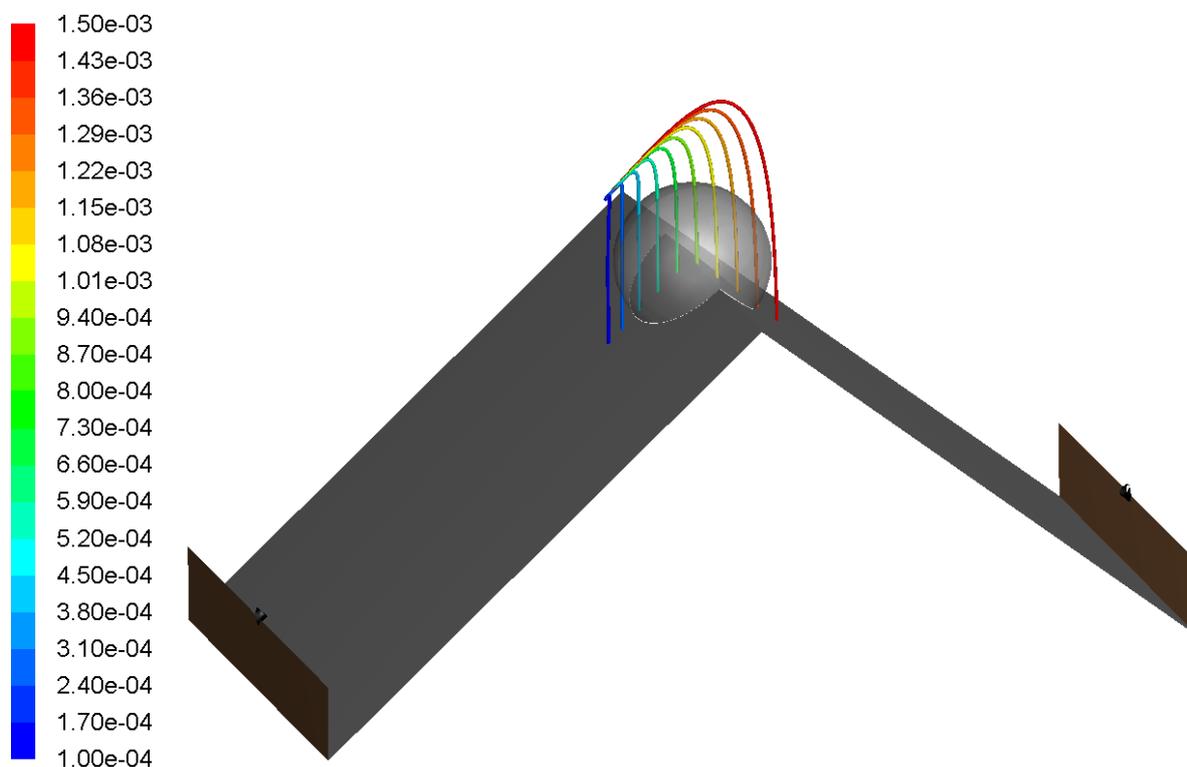


Рис. 3.15. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 1)

Из рис. 3.15 видно, что в варианте № 1 большая часть капель, за исключением самых мелких и самых крупных, попадает в пылевое облако. При этом все капли осаждаются в пределах складской площадки.

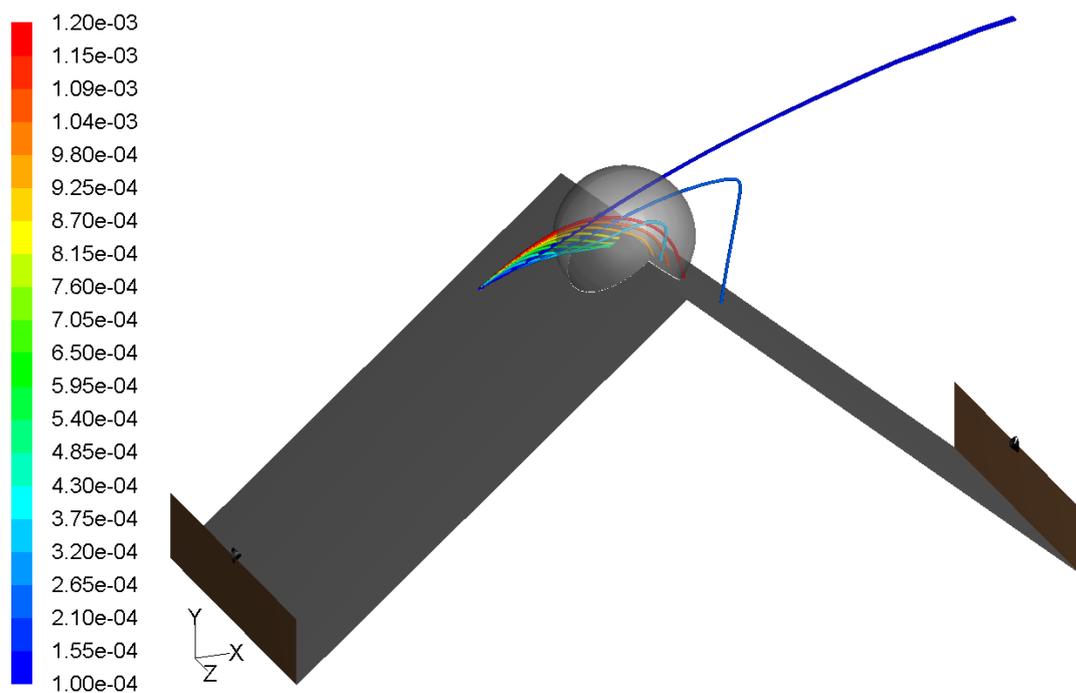


Рис. 3.16. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 2)

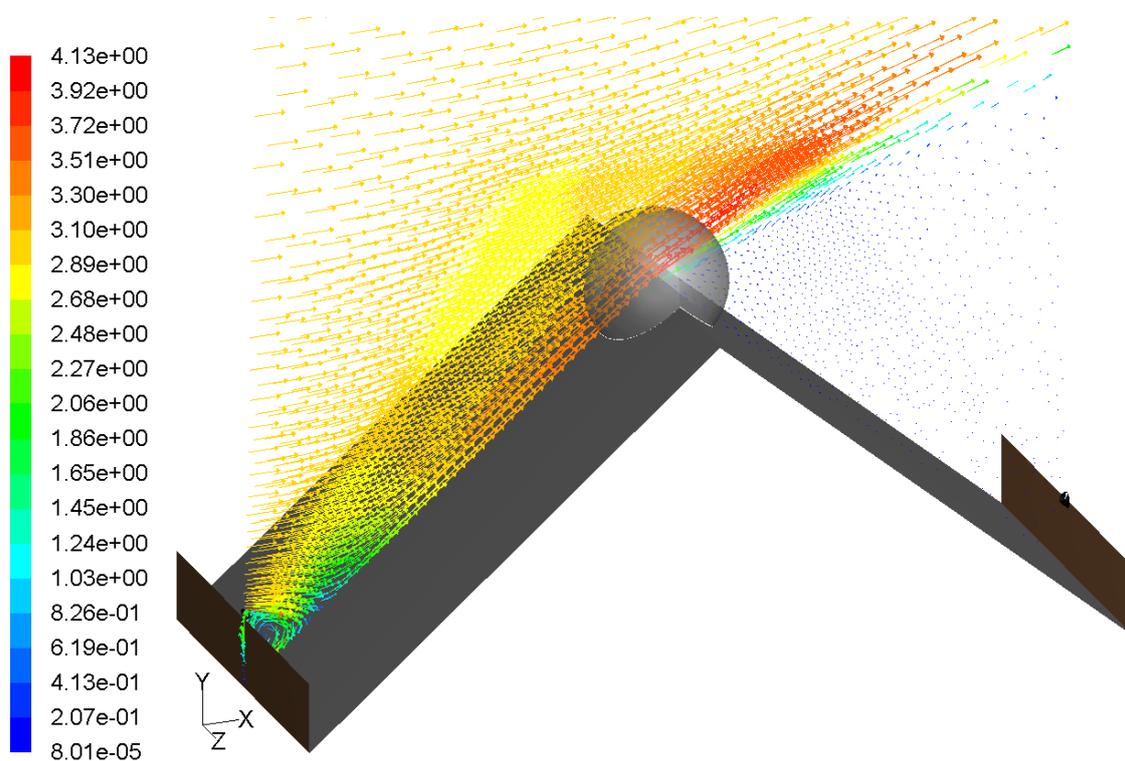


Рис. 3.17. Векторы скорости воздуха в плоскости симметрии расчетной области, окрашенные в соответствии с абсолютным значением скорости, м/с (вариант № 2)

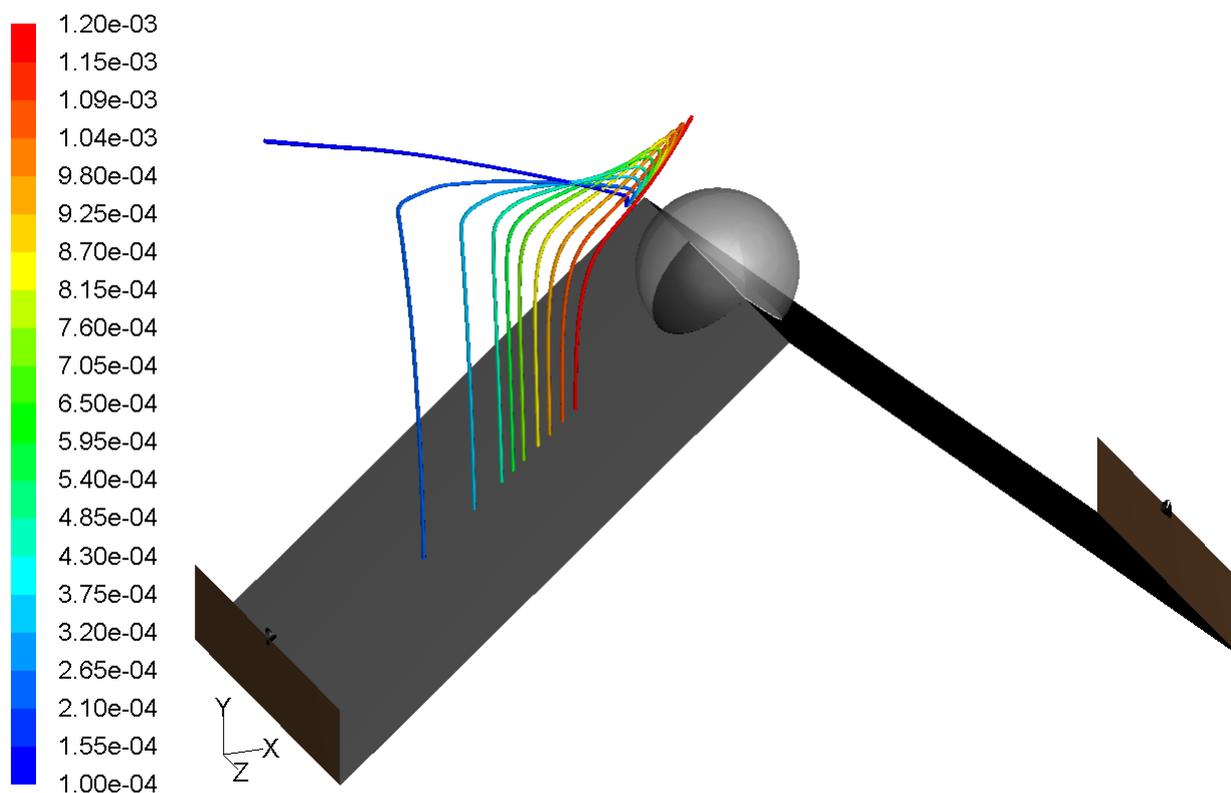


Рис. 3.18. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 3)

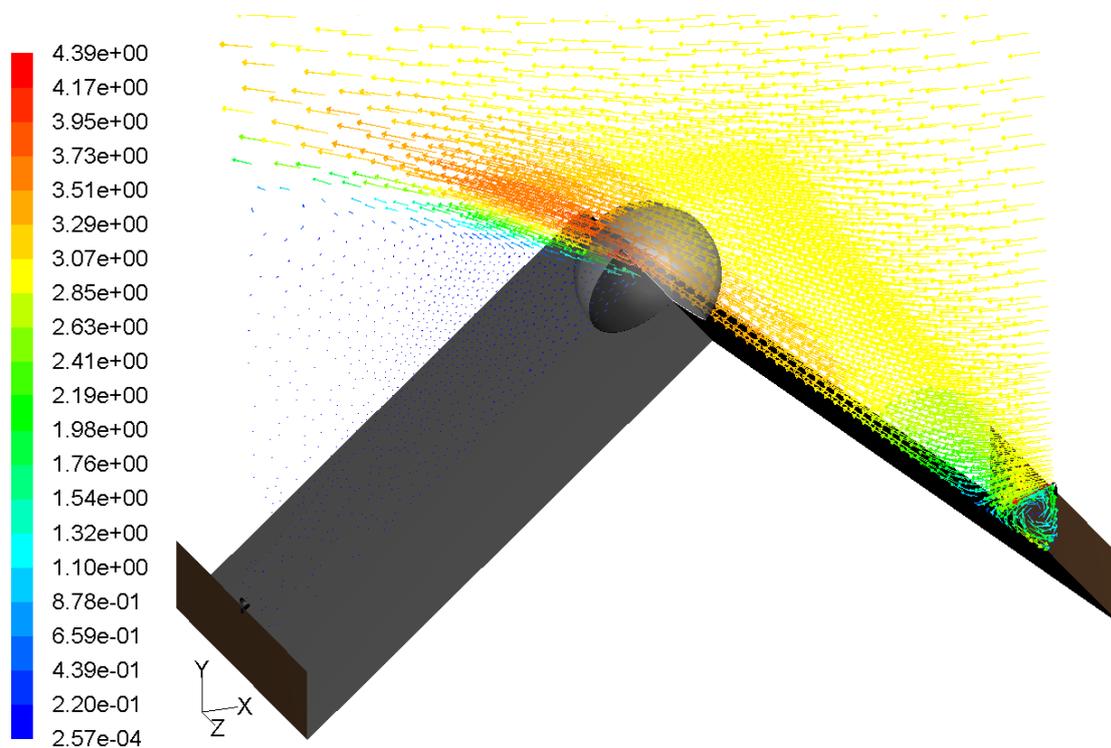


Рис. 3.19. Векторы скорости воздуха в плоскости симметрии расчетной области, окрашенные в соответствии с абсолютным значением скорости, м/с (вариант № 3)

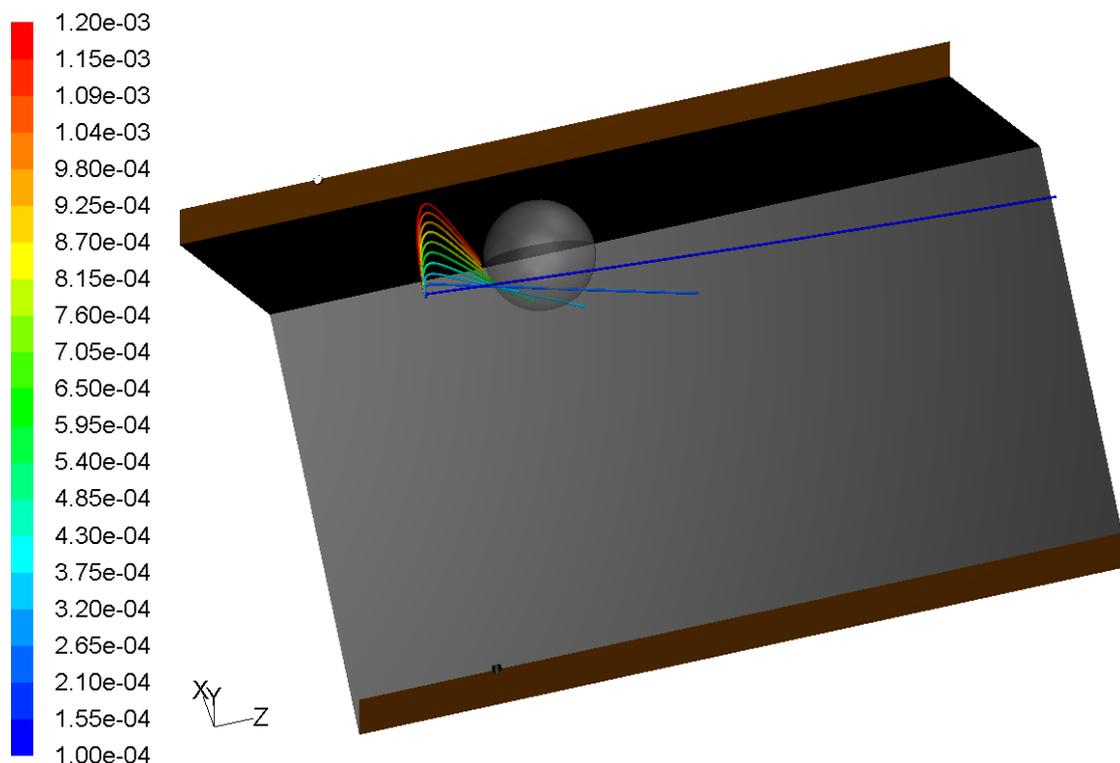


Рис. 3.20. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 4)

Из рис. 3.16 видно, что в варианте № 2 все капли попадают в пылевое облако. Однако самые мелкие капли выносятся спутным ветром (см. рис. 3.17) за пределы складской площадки.

Из рис. 3.18 видно, что в варианте № 3 ни одна из капель не достигает пылевого облака: все они сносятся назад встречным ветром (см. рис. 3.19). При этом большинство капель осаждаются в пределах складской площадки. Самые мелкие капли выносятся встречным ветром за пределы складской площадки.

Из рис. 3.20 видно, что в варианте № 4 часть представительных капель достигает пылевого облака. При этом большинство капель осаждаются в пределах складской площадки. Самые мелкие капли выносятся боковым ветром за пределы складской площадки.

Результаты расчетов времени пребывания капель в пылевом облаке и массовой доли капель, не попавших в пылевое облако, для вариантов № 1, № 2 и № 4 сведены в табл. 3.3, 3.4 и 3.5 соответственно.

Таблица 3.3

Время пребывания представительных капель в пылевом облаке
(вариант № 1)

Номер капли	Диаметр, мкм	Массовый расход, кг/с	Время входа в пылевое облако, с	Время выхода из пылевого облака, с	Время пребывания в пылевом облаке, с
Капли, попавшие в пылевое облако					
7	1189	0,05	1,6317	2,5335	0,9018
8	1344	0,0395	1,8568	2,4948	0,6380
1	255	0,0265	2,9052	5,1200	2,2148
2	411	0,0461	1,5283	3,8712	2,3429
3	566	0,0595	1,2820	2,9353	1,6533
4	722	0,06585	1,2815	2,4699	1,1884
5	877	0,06535	1,3576	2,2743	0,9167
6	1033	0,0595	1,4749	2,4099	0,9350
17	1188	0,05	1,6317	2,5335	0,9018
18	1344	0,0395	1,8568	2,4948	0,6380
11	255	0,0265	2,9052	5,1200	2,2148
12	411	0,0461	1,5283	3,8712	2,3429
13	566	0,0595	1,2820	2,9353	1,6533
14	722	0,06585	1,2815	2,4699	1,1884
15	877	0,06535	1,3576	2,2743	0,9167
16	1033	0,0595	1,4749	2,4099	0,9350
Σ		0,8246			21,5818
Капли, не попавшие в пылевое облако					
9	1500	0,0294			
19	1500	0,0294			
0	100	0,00495			
10	100	0,00495			
Σ		0,0687			

Таблица 3.4

Время пребывания представительных капель в пылевом облаке
(вариант № 2)

Номер капли	Диаметр, мкм	Массовый расход, кг/с	Время входа в пылевое облако, с	Время выхода из пылевого облака, с	Время пребывания в пылевом облаке, с
Капли, попавшие в пылевое облако					
1	255	0,0265	1,05400	2,993300	1,93930
2	411	0,0461	0,83316	2,857300	2,02414
3	566	0,0595	0,61997	1,486000	0,86603

Окончание табл. 3.4

Номер капли	Диаметр, мкм	Массовый расход, кг/с	Время входа в пылевое облако, с	Время выхода из пылевого облака, с	Время пребывания в пылевом облаке, с
4	722	0,06585	0,49309	1,286800	0,79371
5	877	0,06535	0,42013	1,164500	0,74437
6	1033	0,0595	0,37615	1,760200	1,38405
7	1188	0,05	0,34847	1,761300	1,41283
8	1344	0,0395	0,32881	1,570400	1,24159
9	1500	0,0294	0,31412	1,396800	1,082680
11	255	0,0265	1,05400	2,993300	1,93930
12	411	0,0461	0,83316	2,857300	2,02414
13	566	0,0595	0,61997	1,486000	0,86603
14	722	0,06585	0,49309	1,286800	0,79371
15	877	0,06535	0,42013	1,164500	0,74437
16	1033	0,0595	0,37615	1,760200	1,38405
17	1188	0,05	0,34847	1,761300	1,41283
18	1344	0,0395	0,32881	1,570400	1,24159
19	1500	0,0294	0,31412	1,396800	1,082680
Σ		0,8834			22,9774
Капли, не попавшие в пылевое облако					
0	100	0,00495			
10	100	0,00495			
Σ		0,0099			

Из табл. 3.3 видно, что в варианте № 1 суммарное время пребывания всех капель в пылевом облаке составило 21,6 с. При этом массовая доля капель, не попавших в пылевое облако, – 7,7 %.

Из табл. 3.4 видно, что в варианте № 2 суммарное время пребывания всех капель в пылевом облаке составило 23 с. При этом массовая доля капель, не попавших в пылевое облако, – 1,1 %.

Таблица 3.5

Время пребывания представительных капель в пылевом облаке
(вариант № 4)

Номер капли	Диаметр, мкм	Массовый расход, кг/с	Время входа в пылевое облако, с	Время выхода из пылевого облака, с	Время пребывания в пылевом облаке, с
Капли, попавшие в пылевое облако					
2	411	0,0461	1,9693	3,1518	1,1825
3	566	0,0595	1,7969	2,9241	1,1272

Окончание табл. 3.5

Номер капли	Диаметр, мкм	Массовый расход, кг/с	Время входа в пылевое облако, с	Время выхода из пылевого облака, с	Время пребывания в пылевом облаке, с
4	722	0,06585	1,7496	2,4622	0,7126
5	877	0,06535	1,7662	2,2463	0,4801
6	1033	0,0595	1,8351	2,3849	0,5498
7	1188	0,05	1,9557	2,5102	0,5545
12	411	0,0461	1,9693	3,1518	1,1825
13	566	0,0595	1,7969	2,9241	1,1272
14	722	0,06585	1,7496	2,4622	0,7126
15	877	0,06535	1,7662	2,2463	0,4801
16	1033	0,0595	1,8351	2,3849	0,5498
17	1188	0,05	1,9557	2,5102	0,5545
Σ		0,6926			9,2134
Капли, не попавшие в пылевое облако					
0	100	0,00495			
1	255	0,0265			
9	1500	0,0294			
10	100	0,00495			
11	255	0,0265			
19	1500	0,0294			
8	1344	0,0395			
18	1344	0,0395			
Σ		0,2007			

Из табл. 3.5 видно, что в варианте № 4 суммарное время пребывания всех капель в пылевом облаке составило 9,2 с. При этом массовая доля капель, не попавших в пылевое облако, – 22,4 %.

3.6.2. Орошение атомайзером

Исследовано несколько вариантов орошения пылевого облака брандспойтом, различавшихся углом подачи, скоростью выдува аэрозоля, скоростью и направлением ветра.

Во всех вариантах использованы следующие параметры распределения капель по размерам.

Минимальный диаметр капель в распыле – 60 мкм.

Максимальный диаметр капель в распыле – 130 мкм.

Средний медианный диаметр капель в распыле – 100 мкм.

Показатель степени в формуле Розина–Раммлера (2.11) – 3.

Гистограмма распределения капель по размерам, соответствующая указанным выше параметрам, показана на рис. 3.21.

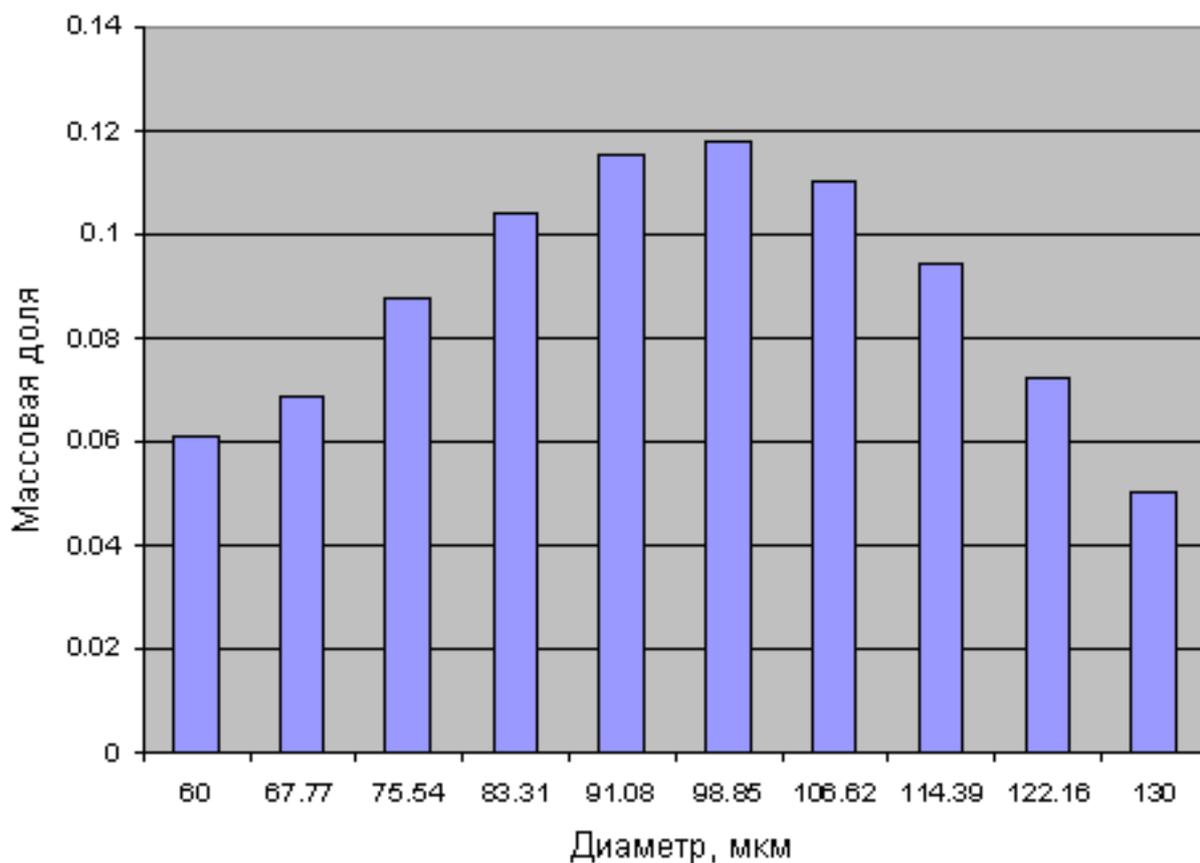


Рис. 3.21. Гистограмма распределения капель по размерам при орошении атомайзером

Для дальнейшего анализа были отобраны 11 вариантов с углами подачи 45 и 60° (табл. 3.6, рис. 3.22 – 3.32).

Таблица 3.6
Варианты орошения пылевого облака атомайзером

Вариант	Угол, град	Скорость выдува аэрозоля, м/с	Ветер	
			Скорость, м/с	Направление
5	45	10	0	–
6	60	10	0	–
7	45	10	3	спутный
8	60	10	3	спутный
9	45	15	3	спутный
10	60	15	3	спутный
11	45	2	3	встречный
12	45	10	3	встречный
13	60	10	3	встречный
14	45	20	1	боковой
15	45	20	2	боковой

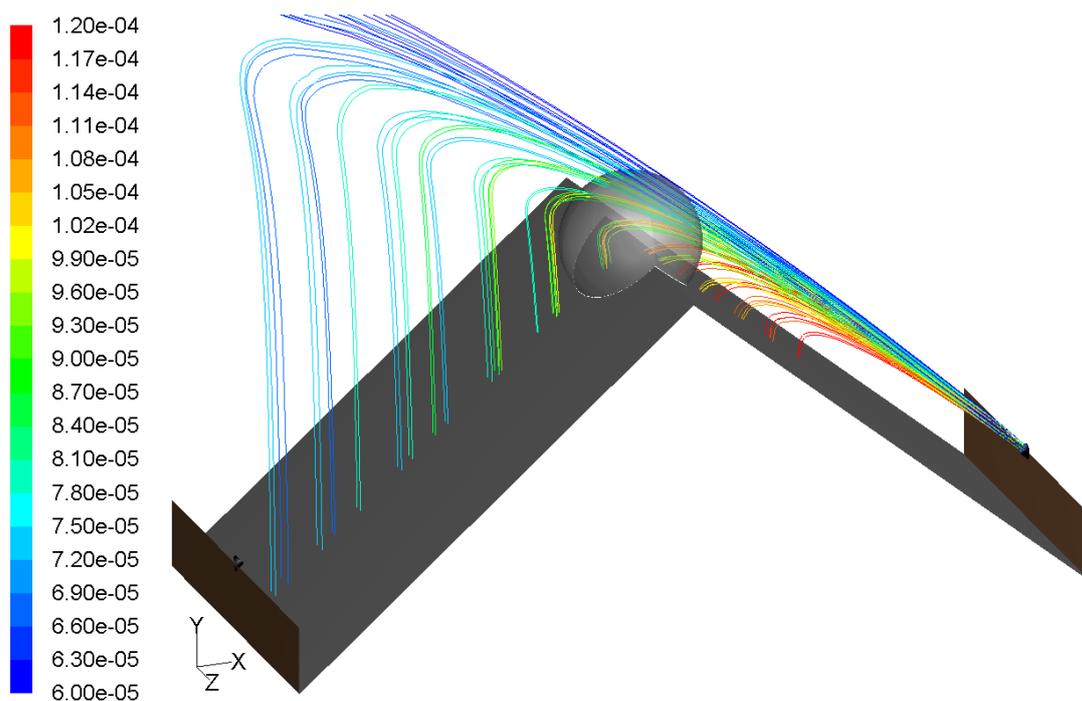


Рис. 3.22. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 5)

Из рис. 3.22 видно, что в варианте № 5 большая часть капель, за исключением наиболее крупных, попадает в пылевое облако. При этом большая часть капель, за исключением наиболее мелких, осаждается в пределах складской площадки.

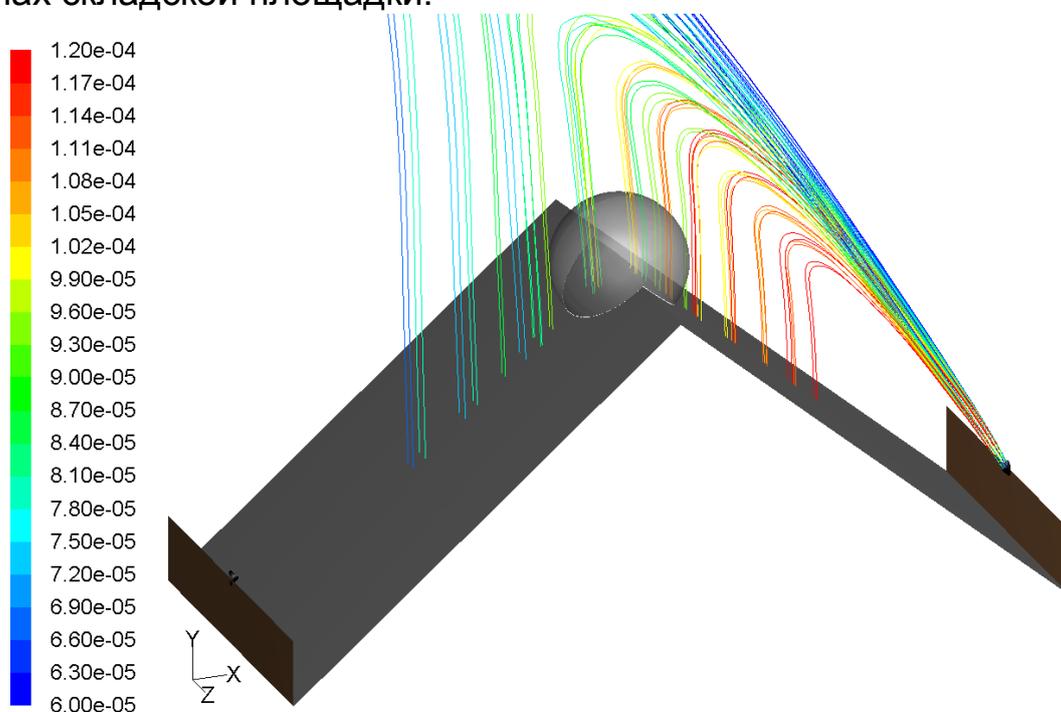


Рис. 3.23. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 6)

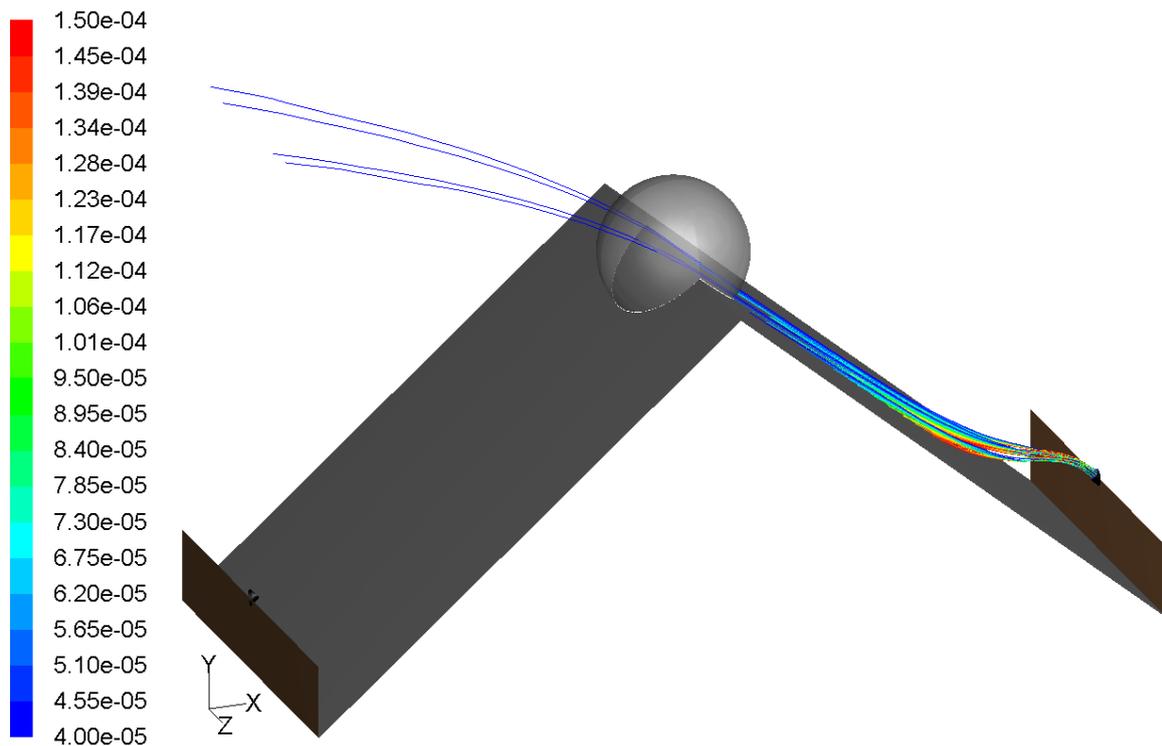


Рис. 3.23. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 7)

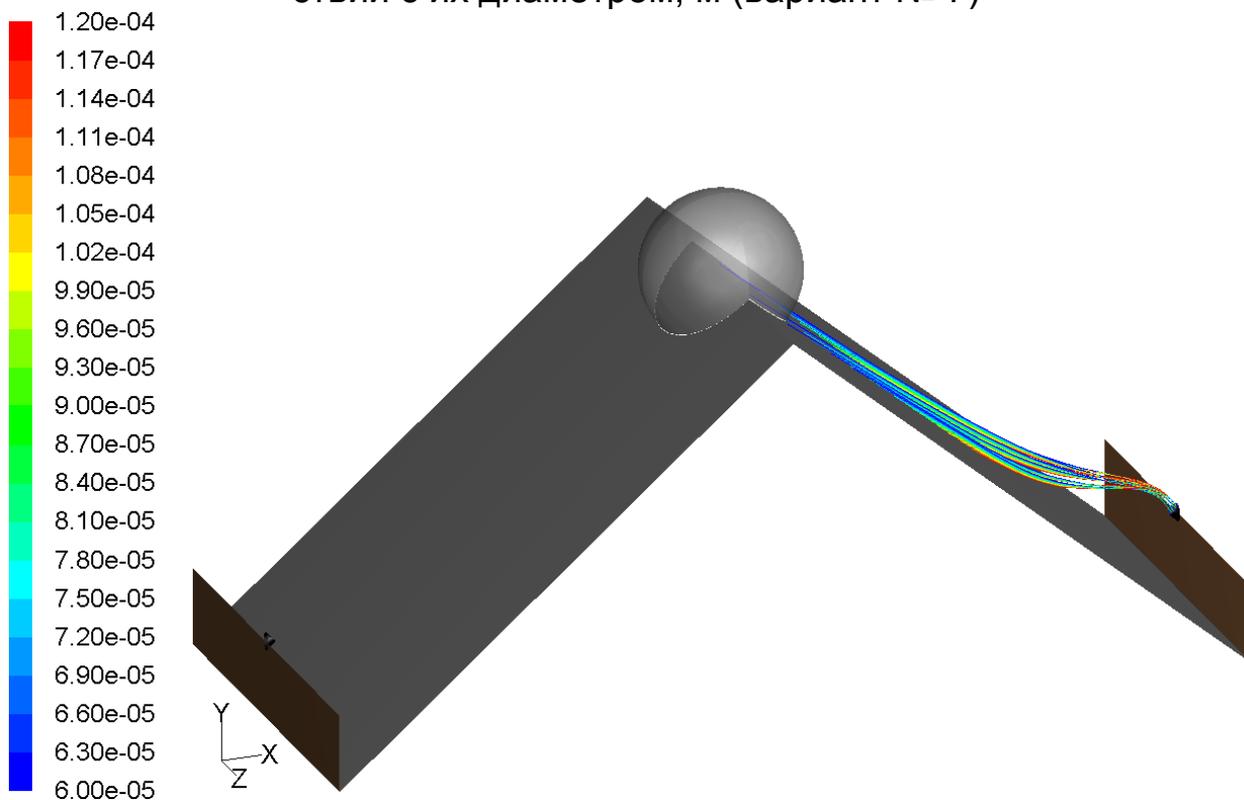


Рис. 3.25. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 8)

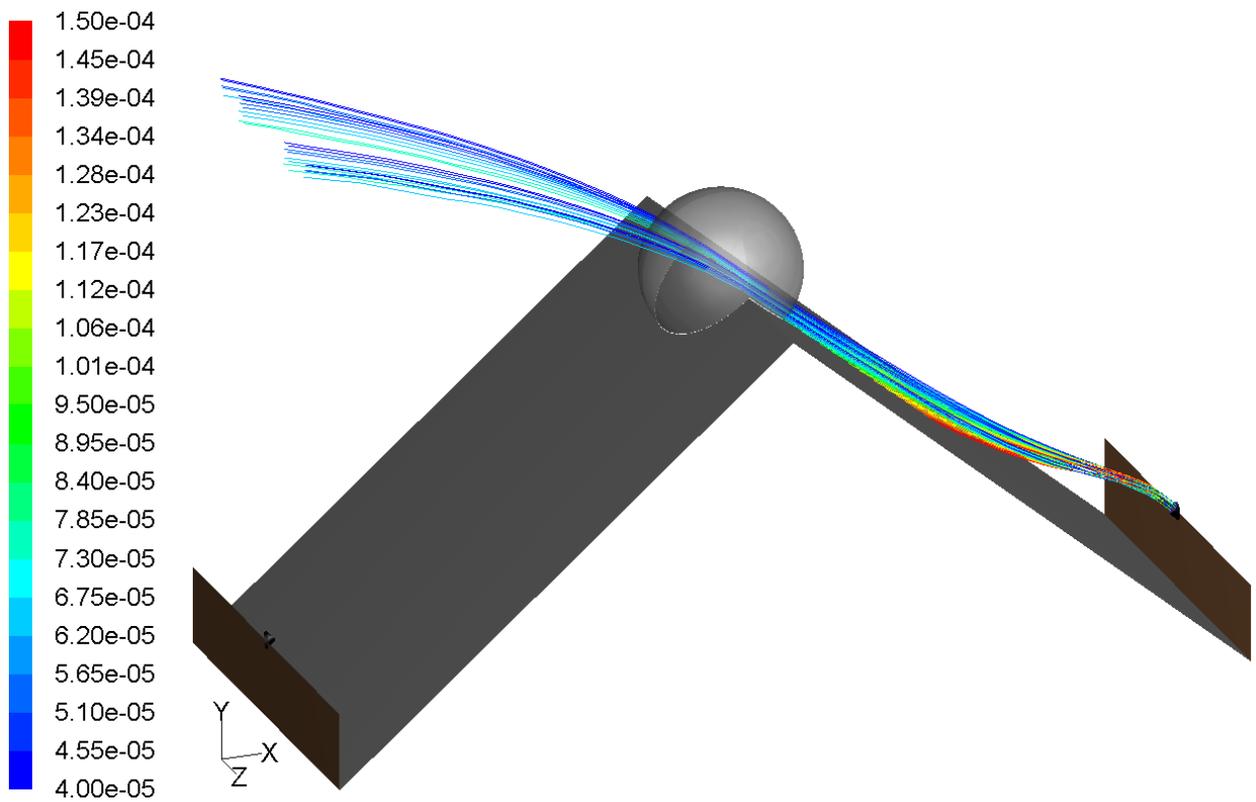


Рис. 3.26. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 9)

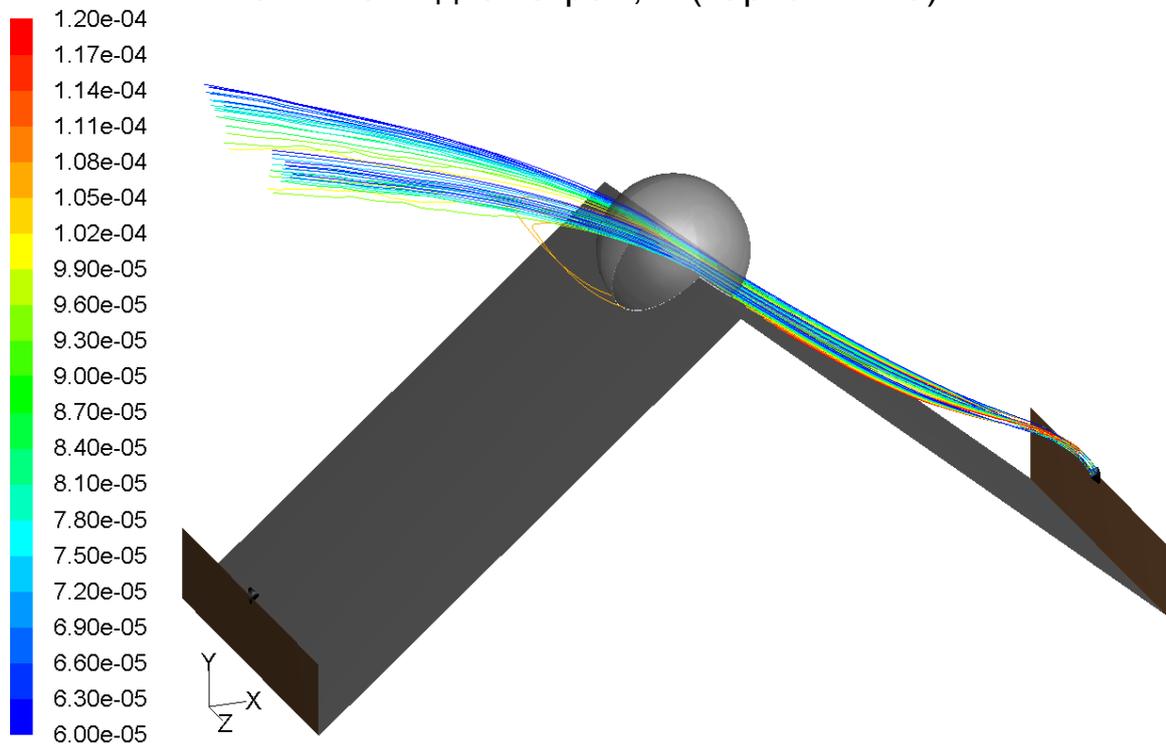


Рис. 3.27. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 10)

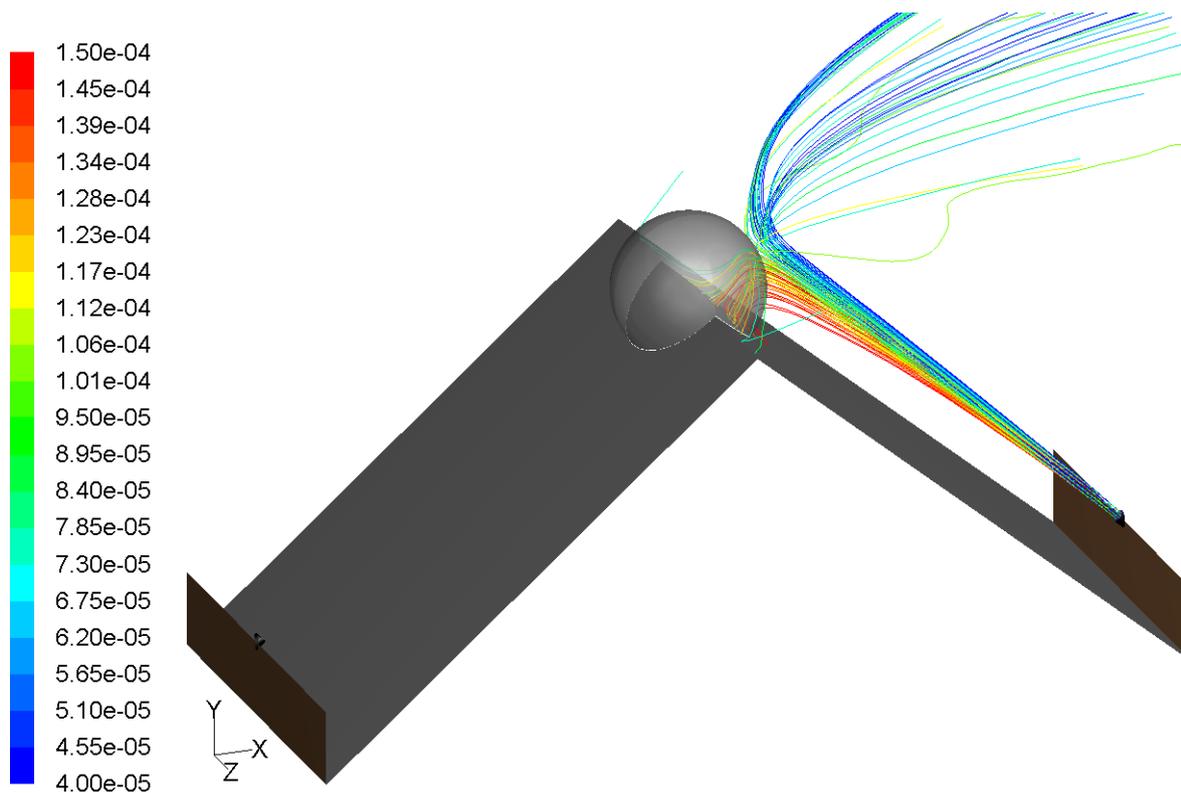


Рис. 3.28. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 11)

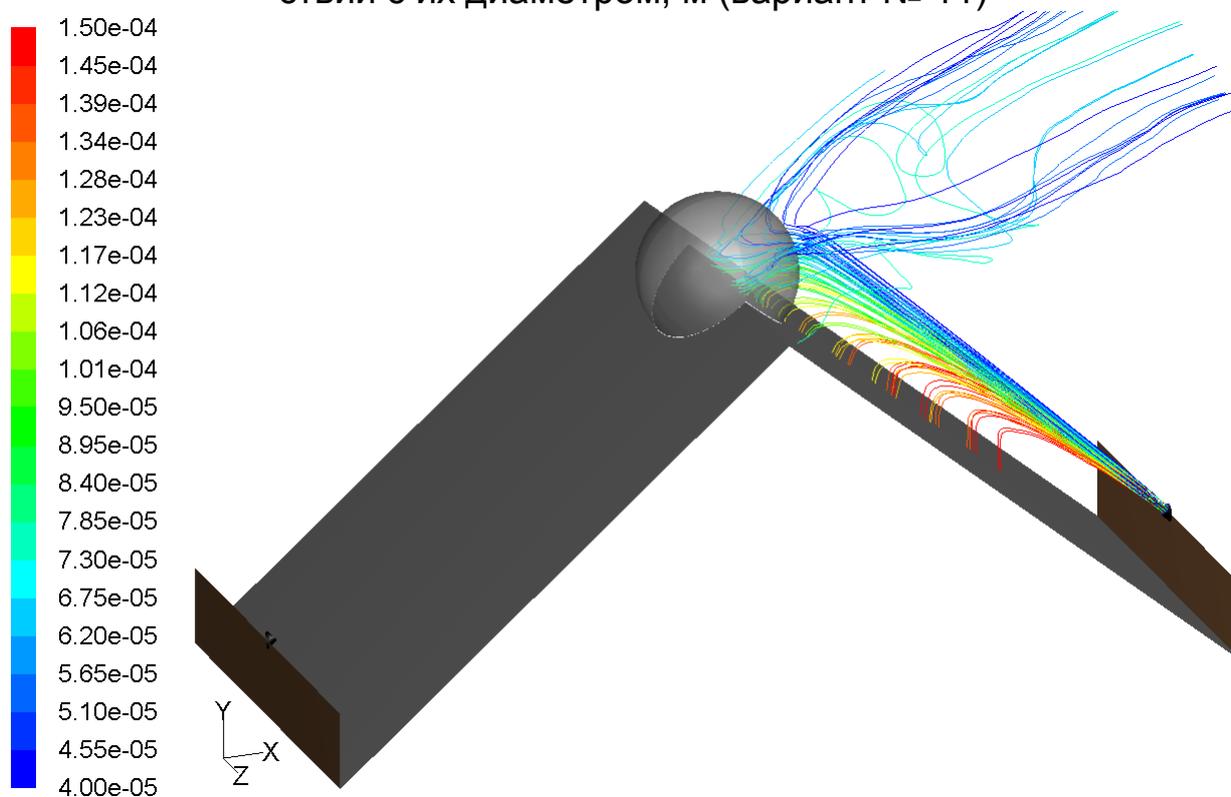


Рис. 3.29. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 12)

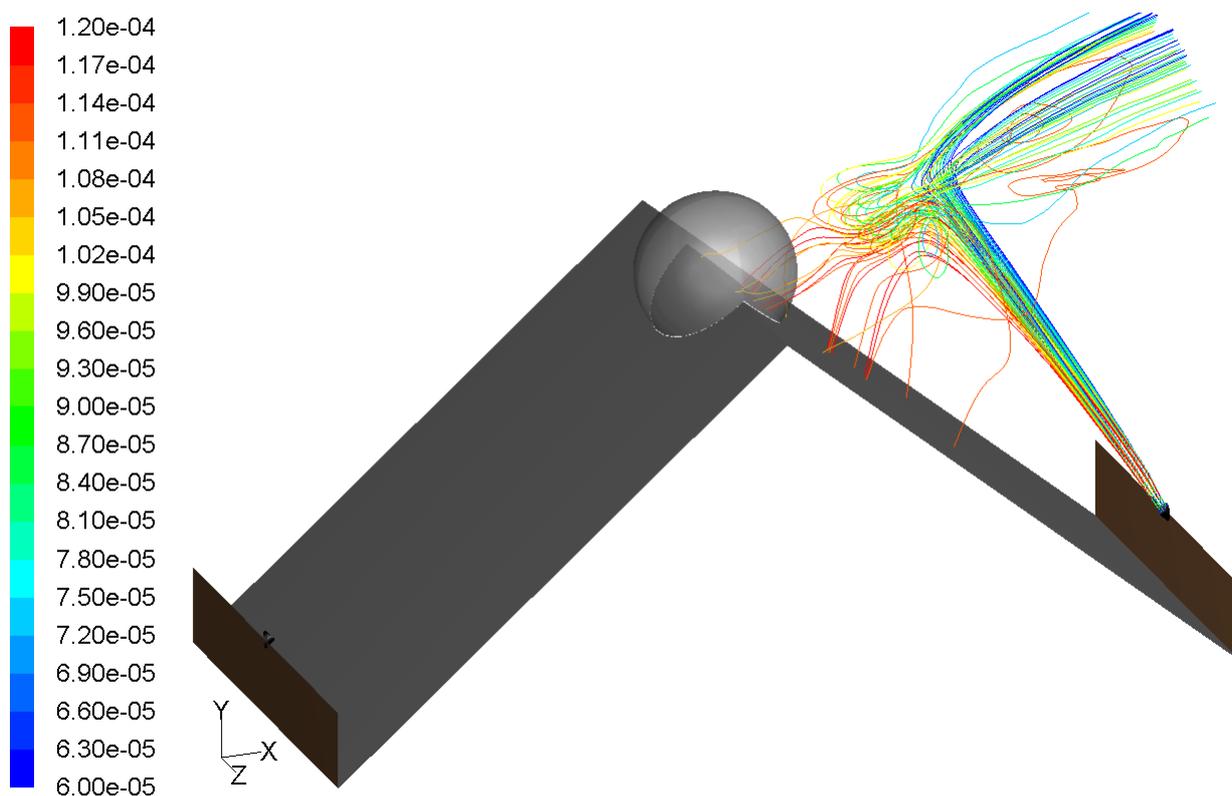


Рис. 3.30. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 13)

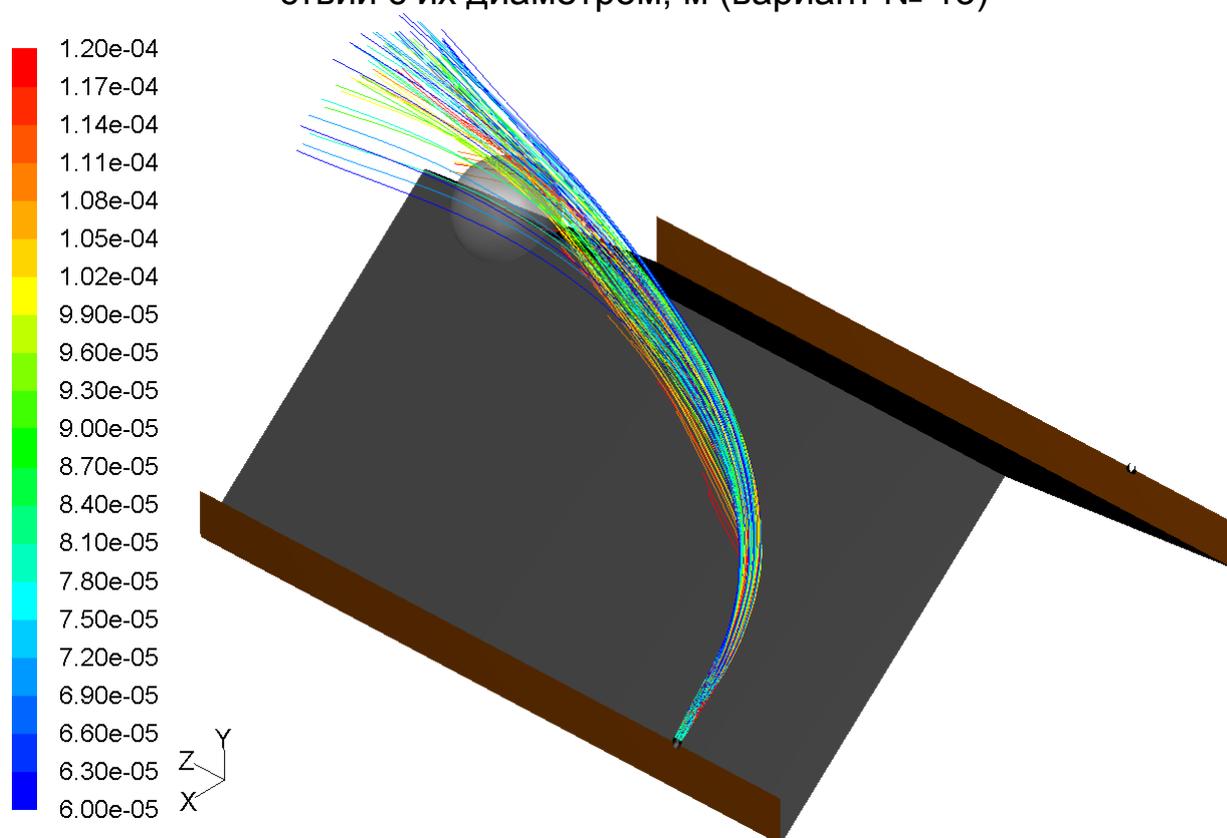


Рис. 3.31. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 14)

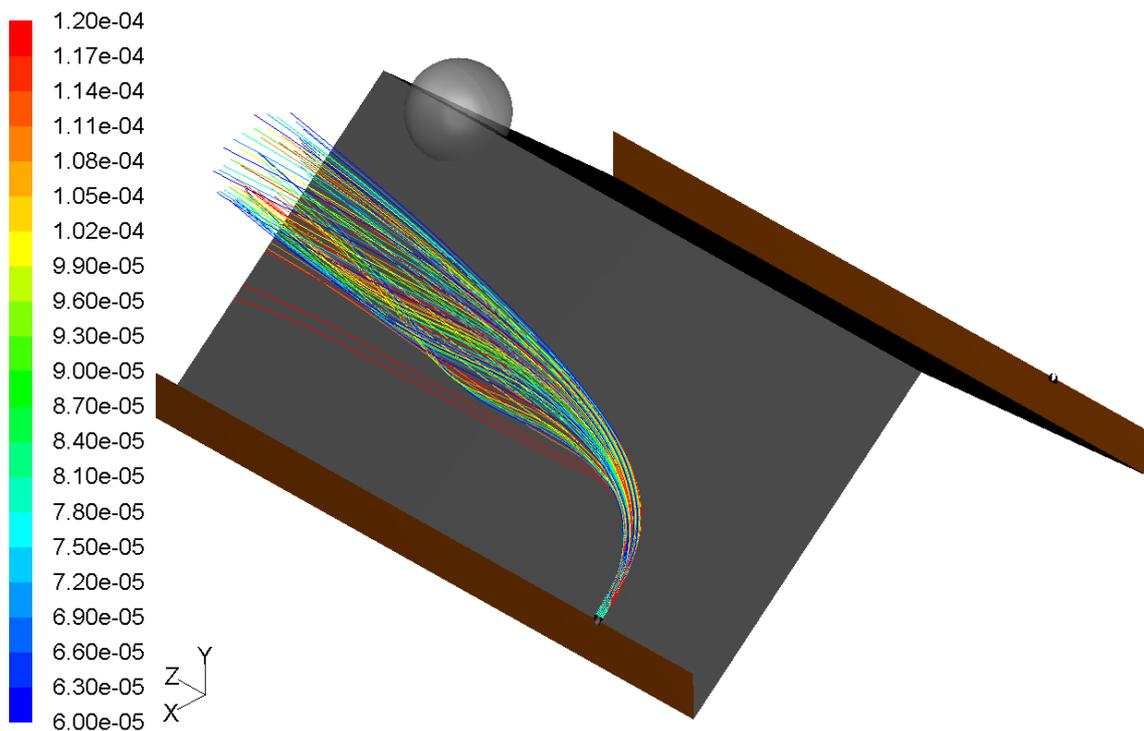


Рис. 3.32. Траектории представительных капель, окрашенные в соответствии с их диаметром, м (вариант № 15)

Из рис. 3.23 видно, что в варианте № 6 только часть капель попадает в пылевое облако. При этом все капли осаждаются в пределах складской площадки.

Из рис. 3.24 видно, что в варианте № 7 большая часть капель осаждаются на наветренном склоне штабеля, не достигнув пылевого облака. В пылевое облако попадают только самые мелкие капли, которые выносятся спутным ветром за пределы складской площадки.

Из рис. 3.25 видно, что в варианте № 8 все капли осаждаются на наветренном склоне штабеля, не достигнув пылевого облака.

Из рис. 3.26 видно, что в варианте № 9 более крупные капли осаждаются на наветренном склоне штабеля, не достигнув пылевого облака. В пылевое облако попадают более мелкие капли, которые выносятся спутным ветром за пределы складской площадки.

Из рис. 3.27 видно, что в варианте № 10 только самые крупные капли осаждаются на наветренном склоне штабеля, не достигнув пылевого облака. Все остальные капли попадают в пылевое облако и выносятся спутным ветром за пределы складской площадки. Исключение составляют капли средних размеров, которые, будучи вовлечены в зону обратных токов воздуха, возникающую за подветренным склоном штабеля, осаждаются на его поверхности.

Из рис. 3.28 видно, что в варианте № 11 крупные капли достигают пылевого облака и осаждаются на подветренном склоне штабеля. Мелкие

капли разворачиваются встречным ветром и выносятся им за пределы складской площадки.

Из рис. 3.29 видно, что в варианте № 12 только часть капель достигают пылевого облака. Значительная часть более крупных капель осаждаются на подветренном склоне штабеля, не достигнув пылевого облака. Наиболее мелкие капли разворачиваются встречным ветром и выносятся им за пределы складской площадки.

Из рис. 3.30 видно, что в варианте № 13 незначительная часть крупных капель достигает пылевого облака. Большая часть капель не достигает пылевого облака: наиболее крупные капли осаждаются на подветренном склоне штабеля, не достигнув пылевого облака, а более мелкие капли разворачиваются встречным ветром и выносятся им за пределы складской площадки.

Из рис. 3.31 видно, что в варианте № 14 часть капель попадает в пылевое облако. При этом все капли выносятся боковым ветром за пределы складской площадки.

Из рис. 3.32 видно, что в варианте № 15 ни одна из капель не достигает пылевого облака, все они выносятся боковым ветром за пределы складской площадки.

Результаты расчетов времени пребывания капель в пылевом облаке и массовой доли капель, не попавших в пылевое облако, для вариантов № 5 и № 6 сведены в табл. 3.7 и 3.8 соответственно.

Таблица 3.7

Время пребывания представительных капель в пылевом облаке
(вариант № 5)

Номер капли	Диаметр, мкм	Массовый расход, кг/с	Время входа в пылевое облако, с	Время выхода из пылевого облака, с	Время пребывания в пылевом облаке, с
Капли, попавшие в пылевое облако					
2	73	0,024488	7,2638	9,8283	2,5645
3	80	0,028167	7,399	10,836	3,437
4	86	0,030667	7,5662	12,71	5,1438
5	93	0,031518	7,7669	15,754	7,9871
11	66	0,020182	7,6127	10,673	3,0603
12	73	0,024488	7,6917	11,905	4,2133
13	80	0,028167	7,9117	13,632	5,7203
14	86	0,030667	8,4862	17,658	9,1718
21	66	0,020182	7,7521	11,621	3,8689
22	73	0,024488	8,0806	13,318	5,2374
23	80	0,028167	8,8319	17,137	8,3051
32	73	0,024488	7,1766	9,0493	1,8727
33	80	0,028167	7,1148	9,637	2,5222
34	86	0,030667	7,192	10,436	3,244
35	93	0,031518	7,3149	11,91	4,5951

Окончание табл. 3.7

Номер капли	Диаметр, мкм	Массовый расход, кг/с	Время входа в пылевое облако, с	Время выхода из пылевого облака, с	Время пребывания в пылевом облаке, с
36	100	0,030458	7,4603	15,121	7,6607
6	100	0,030458	8,3729	25,969	17,5961
15	93	0,031518	9,2141	26,325	17,1109
24	86	0,030667	9,5334	31,435	21,9016
37	106	0,027544	7,8242	23,539	15,7148
7	106	0,027544	9,3978	15,611	6,2132
8	113	0,023178	13,153	13,641	0,488
16	100	0,030458	11,283	16,12	4,837
25	93	0,031518	11,704	17,002	5,298
38	113	0,023178	8,8146	14,477	5,6624
39	120	0,018035	11,066	13,282	2,216
Σ		0,710577			175,6422
Капли, не попавшие в пылевое облако					
0	60	0,015763			
1	66	0,020182			
9	120	0,018035			
10	60	0,015763			
17	106	0,027544			
18	113	0,023178			
19	120	0,018035			
20	60	0,015763			
26	100	0,030458			
27	106	0,027544			
28	113	0,023178			
29	120	0,018035			
30	60	0,015763			
31	66	0,020182			
Σ		0,273660			

Из табл. 3.7 видно, что в варианте № 5 суммарное время пребывания всех капель в пылевом облаке составило 175,6 с. При этом массовая доля капель, не попавших в пылевое облако, – 27,8 %.

Таблица 3.8

Время пребывания представительных капель в пылевом облаке
(вариант № 6)

Номер капли	Диаметр, мкм	Массовый расход, кг/с	Время входа в пылевое облако, с	Время выхода из пылевого облака, с	Время пребывания в пылевом облаке, с
Капли, попавшие в пылевое облако					
6	100	0,030458	59,377	73,698	14,321
15	93	0,031518	58,024	76,88	18,856

Окончание табл. 3.8

Номер капли	Диаметр, мкм	Массовый расход, кг/с	Время входа в пылевое облако, с	Время выхода из пылевого облака, с	Время пребывания в пылевом облаке, с
24	86	0,030667	68,457	88,541	20,084
37	106	0,027544	53,378	66,665	13,287
38	113	0,023178	42,673	56,156	13,483
5	93	0,031518	84,789	101,16	16,371
14	86	0,030667	91,014	108,86	17,846
23	80	0,028167	110,31	131,18	20,87
36	100	0,030458	74,031	88,506	14,475
7	106	0,027544	46,18	60,963	14,783
Σ		0,291719			164,376
Капли, не попавшие в пылевое облако					
0	60	0,015763			
1	66	0,020182			
2	73	0,024488			
3	80	0,028167			
4	86	0,030667			
8	113	0,023178			
9	120	0,018035			
10	60	0,015763			
11	66	0,020182			
12	73	0,024488			
13	80	0,028167			
16	100	0,030458			
17	106	0,027544			
18	113	0,023178			
19	120	0,018035			
20	60	0,015763			
21	66	0,020182			
22	73	0,024488			
25	93	0,031518			
26	100	0,030458			
27	106	0,027544			
28	113	0,023178			
29	120	0,018035			
30	60	0,015763			
31	66	0,020182			
32	73	0,024488			
33	80	0,028167			
34	86	0,030667			
35	93	0,031518			
39	120	0,018035			
Σ		0,708281			

Из табл. 3.8 видно, что в варианте № 6 суммарное время пребывания всех капель в пылевом облаке составило 164,4 с. При этом массовая доля капель, не попавших в пылевое облако, – 70,8 %.

Таким образом, определены параметры многофазных потоков, которые позволяют устанавливать многофазные дисперсные структуры в рабочей зоне.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕЛКОКАПЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ОПАСНОСТИ, ВЫЗВАННОЙ ПРИРОДНЫМИ ИЛИ ТЕХНОГЕННЫМИ ФАКТОРАМИ

В настоящее время можно предложить несколько известных и новых направлений использования мелкокапельных технологий для создания систем управления экологической безопасностью. При этом опасности вызываются такими природными или техногенными факторами:

1. Гашение лесного или степного пожара, воздействующего на лесной фитоценоз и растительный покров.

2. Снижение последствий пожара при его возникновении и распространении в зданиях и сооружениях.

3. Уменьшение количества пыли и газообразных примесей при утилизации взрывчатых веществ.

4. Уменьшение количества мелкодисперсных взвешенных частиц при обработке сыпучих пылящих материалов (погрузка-разгрузка сыпучих материалов, добыча полезных ископаемых в карьерах).

5. Обеспечение приемлемого уровня экологической и производственной безопасности промышленных объектов на основе использования технических средств по локализации и защите от последствий аварий, например при взрывах пылегазовоздушных смесей в шахтах.

Адекватное описание вышеназванных процессов – горение, выброс, смешение и распространение газовой примеси в атмосфере; истечение газовой примеси в атмосферу; взрыв газообразной примеси в атмосфере с учетом химического взаимодействия (в том числе в многосвязных областях со сложным рельефом местности или в закрытых объемах), –использующих для снижения экологического и пожарного рисков мелкокапельные технологии, возможно только с использованием системы нестационарных уравнений Навье–Стокса для сжимаемого газа. В настоящее время численное моделирование турбулентных течений осуществляют путем решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, дополненных моделью турбулентности [18, 20, 35, 85, 157, 237, 238]. Однако большинство моделей турбулентности не описывают с одинаковой степенью адекватности различные типы течений, особенно это касается течений с интенсивными отрывами потока и/или большими градиентами давления температуры. Поэтому

существует необходимость построения новых моделей и расчетных схем для численного моделирования таких течений.

Целью данного раздела является разработка математических моделей для систем управления экологическими процессами при горении, выбросе, смешении и распространении газовой примеси в атмосфере, истечении газовой примеси в атмосферу; взрыве газообразной примеси в атмосфере с учетом химического взаимодействия (в том числе в многосвязных областях со сложным рельефом местности или в закрытых объемах), а также термодинамических свойств газов и алгоритма численного моделирования этих процессов.

4.1. Аналитический обзор математических методов моделирования газодинамических процессов, используемых при разработке систем управления экологической безопасностью

Развитие вычислительной математики и создание высокопроизводительных ЭВМ способствовали широкому их применению в науке и технике, в частности для анализа и оптимизации различных газодинамических процессов. В настоящее время в газовой динамике сформировалось новое научное направление – вычислительная газовая динамика, целью которой является моделирование реальных газодинамических процессов и получение новых знаний в этой области. Быстрое развитие вычислительной газовой динамики обусловлено рядом причин, главными из которых можно назвать невозможность получения характеристик течения в газодинамических процессах на моделях для некоторых режимов работы, большие энергетические затраты на проведение экспериментов, большая стоимость их создания. Вместе с тем эффективность численных алгоритмов постоянно возрастает, что наряду с совершенствованием ЭВМ приводит к уменьшению стоимости моделирования и расширению классов исследуемых задач.

Сформировавшись как новое научное направление, вычислительная газовая динамика выдвинула ряд проблем, из которых можно выделить основные [231]:

- необходимость разработки все более полных физико-математических моделей, справедливых для описания реальных течений в широком диапазоне режимных параметров;
- построение эффективных численных алгоритмов с учетом новых структур и архитектур ЭВМ;
- создание новых высокопроизводительных ЭВМ;
- разработка математического обеспечения и на его основе – объектно-ориентированных информационных систем; такие системы называют САЕ-системами (Computer-Aided Engineering – системы инженерного анализа).

В отечественной практике инженерный анализ представлен зарубежными системами ANSYS, CFX-TASCflow, FLOTRAN, Star-CD, Fluent, Phoenics. Системы ANSYS применяют для прочностных и тепловых расчетов элементов узлов сложных технических систем методом конечных элементов в трехмерной постановке, остальные – для анализа процессов течения газов в лопаточных машинах, смесителях и выходных устройствах, анализа распыления и горения топлива в камерах сгорания турбореактивных двигателей и турбоустановок.

Многообразие известных методов моделирования в газовой динамике обусловлено их свойствами. На основе системного анализа (системовыделяющих функций элементов систем, в которых протекают газодинамические процессы, функционально-значимых отношений между ними) можно выделить следующие существенные классификационные признаки течений:

- а) внутреннее (внешнее) обтекание;
- б) размерность пространства:
 - нестационарное, установившееся, стационарное,
 - R_n , $n = 1, 2, 3$;
- в) невязкое:
 - безвихревое (вихревое),
 - изэнтропическое (неизэнтропическое);
- г) вязкое:
 - ламинарное, переходный режим, турбулентное,
 - безотрывное (с локальными зонами отрыва));
- д) несжимаемое (сжимаемое);
- е) однородное (смеси нереагирующих газов и с физико-химическими превращениями в потоке и на поверхности).

Введение перечисленных выше признаков обеспечило возможность структурного анализа сложных трехмерных течений, разработки системных физических и математических моделей сложных газодинамических процессов, позволяющих качественно и количественно анализировать исследуемые явления. Обычно такие модели, построенные в соответствии с принципами системного подхода методом декомпозиции, представляют собой многоуровневые иерархические структуры семейства подсистем с вложенной многослойной иерархией принятия решения для каждой из подсистем. Так, например, в результате декомпозиции трехмерного вязкого течения в каналах сложной формы принято выделять ряд подсистем:

- 1) основной поток:
 - а) плоскопараллельное (осесимметричное) течение,
 - б) канальный вихрь,
 - в) перетекания, вызванные перепуском;
- 2) пристенные течения:
 - а) однородные течения:

- обтекание неподвижной поверхности,
- течение у подвижной поверхности,
- истечение струи;

б) области взаимодействия:

- струи с набегающим потоком,
- смешение в следе,
- угловое подковообразное завихрение.

Анализ экспериментальных данных позволяет высказать предположение о существовании постоянного взаимодействия представленных подсистем, что требует учета их взаимного влияния при построении системной математической модели течения в целом.

В задачах газовой динамики одной из наиболее распространенных математических моделей является приближение сплошной среды, справедливое для описания течений газа в широком диапазоне изменения параметров потока. Учет различных физических эффектов в этом приближении приводит к цепочке газодинамических моделей [11, 20, 21, 135, 231, 268, 271], наиболее полная среди которых описывается уравнениями Навье–Стокса сжимаемого теплопроводного газа:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \operatorname{div} \bar{q},$$

$$\rho \frac{d\bar{q}}{dt} = \rho \bar{f} - \operatorname{grad} P + \operatorname{Div} P_V,$$

$$\rho \frac{d}{dt} \left(e + \frac{q^2}{2} \right) = (\rho \bar{f}, \bar{q}) - \operatorname{div}(P\bar{q}) + P_V \cdot \nabla \bar{q} + \bar{q} \cdot \operatorname{Div} P_V - \operatorname{div} \bar{n}_T + e_S,$$

$$\frac{d}{dt} (\rho Q_i) = -\rho \operatorname{div}(Q_i \bar{q}) - \operatorname{div} \bar{n}_i + \rho_{S_i}, \quad i = 1 \dots N,$$

где t – время; \bar{q} – вектор скорости потока; P – давление; ρ – плотность; e – внутренняя энергия единицы массы газа; \bar{f} – вектор массовых сил; P_V – тензор поверхностных напряжений, обусловленных наличием вязкости; \bar{n}_T – тепловой поток, обусловленный теплопроводностью; e_S – интенсивность тепловыделения в единице объема газа вследствие химических реакций; Q_i – относительная массовая плотность i -й компоненты примеси (отношение плотности газообразного вещества i -й компоненты примеси к плотности смеси); \bar{n}_i – поток массы i -й компоненты примеси; ρ_{S_i} – интенсивность изменения плотности i -й компоненты примеси вследствие химической реакции; N – количество компонент смеси.

Эти уравнения представляют собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, выражающих законы сохранения массы, импульса, энергии, переноса компонент смеси, дополненную уравнениями состояния.

Общий вид уравнений сохраняется и для осредненных параметров турбулентных течений, если воспользоваться понятием эффективных коэффициентов турбулентного переноса. Эти уравнения называют также уравнениями Рейнольдса либо уравнениями Навье–Стокса, осредненными по Рейнольдсу. Эффективные коэффициенты турбулентного переноса рассчитывают по параметрам осредненного течения с привлечением дополнительных уравнений – моделей турбулентности [18, 20, 35, 85, 231, 238].

Тип нестационарных уравнений Навье–Стокса определен как неполнопараболический. Точнее, эта квазилинейная система уравнений в пределе при бесконечном числе Рейнольдса (Re) является гиперболической, а при любом конечном числе Рейнольдса не является ни чисто параболической, ни чисто эллиптической, ни чисто гиперболической. В стационарном случае уравнения Навье–Стокса – уравнения эллиптического типа.

Цепочка упрощенных моделей может быть получена из общей при различных допущениях о характере течения. Таким образом, можно говорить о приближении Навье–Стокса как накрывающей модели [11, 20, 21, 135, 231, 268, 271].

Среди используемых для моделирования широкого класса течений следует выделить несколько основных типов упрощенных уравнений Навье–Стокса:

- приближение тонкого слоя;
- параболизированные уравнения Навье–Стокса;
- уравнения вязкого ударного слоя;
- приближение пограничного слоя;
- уравнения Эйлера.

Уравнения в приближении тонкого слоя получают из нестационарных уравнений Навье–Стокса отбрасыванием вязких членов с производными по направлению продольной (вдоль преимущественного направления потока) координаты на поверхности обтекаемого тела. Хотя уравнения Навье–Стокса в приближении тонкого слоя существенно проще полных, их используют для определения параметров во всей расчетной области отрывных течений с большими градиентами давления в нормальном к обтекаемой поверхности направлении.

Параболизированные уравнения получают из нестационарных уравнений Навье–Стокса отбрасыванием нестационарных членов и вязких членов, содержащих производные по продольной координате. В общем случае вывод параболизированных уравнений Навье–Стокса из полных уравнений является достаточно произвольным. По этой причине возникло несколько слегка отличающихся версий параболизированных уравнений Навье–Стокса. Дополнительное видоизменение вектора конвективного переноса в продольном направлении делает возможным пошаговое интегрирование уравнений по продольной координате во всей расчетной области. Однако отбрасывание вторых производных в продольном направлении в основных уравнениях Навье–Стокса при наличии в потоке продольного градиента давления вызывает при построении решения параболизированных уравнений Навье–Стокса ряд трудностей, таких, как недопустимость появления в ре-

шениях отрыва в продольном направлении и необходимость «отключения» его полностью или частично в дозвуковой части потока, что приводит к искажению полученной в результате расчетов картины течения. Параболизованные уравнения Навье–Стокса дают корректные результаты только при расчете стационарных сверхзвуковых и безотрывных в продольном направлении течений.

Уравнения вязкого ударного слоя являются еще более упрощенной формой уравнений Навье–Стокса. В отличие от параболизованных уравнений Навье–Стокса в уравнениях вязкого ударного слоя заложены дополнительные упрощения относительно вязких членов с производными не только в продольном, но и в поперечном направлениях, благодаря чему их можно решать маршевым методом в любом из перечисленных направлений. Использовать уравнения вязкого ударного слоя возможно лишь при построении решений задач стационарного сверхзвукового безотрывного обтекания тел простой формы.

Из асимптотического анализа уравнений Навье–Стокса следует, что в окрестности поверхности тела толщиной порядка $\frac{1}{\sqrt{Re}}$ вязкость оказывает существенное влияние на течение. В этой области течение описывается уравнениями пограничного слоя. Принципиальным отличием этих уравнений от полных является отсутствие вязких членов с производными в продольном и поперечном направлениях, а также тривиальный вид уравнения количества движения в проекции на нормаль к обтекаемой поверхности. Уравнения пограничного слоя для стационарного течения являются уравнениями параболического типа и допускают решение маршевыми методами.

Прямой асимптотический переход в уравнениях Навье–Стокса при $Re \rightarrow \infty$ приводит к уравнениям Эйлера, описывающим течение газа без учета влияния вязкости. Нестационарные уравнения Эйлера представляют собой систему квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка гиперболического типа. Для стационарных течений уравнения Эйлера являются уравнениями эллиптического типа для дозвуковых течений и гиперболического типа – для сверхзвуковых. Поэтому при расчете дозвуковых течений и течений с локальными дозвуковыми зонами стационарные решения, как и для полной системы уравнений Навье–Стокса, получают методами установления. Однако количество вычислений значительно сокращается в связи с более простым видом уравнений. Расчет стационарных сверхзвуковых течений существенно упрощается, так как появляется возможность получения решения в результате пошагового интегрирования в направлении сверхзвукового течения (маршевыми методами).

Следует отметить, что в случае расчетов внешнего обтекания или внутренних течений, когда хотя бы одной из границ расчетной области является обтекаемая поверхность, целесообразно использовать зонный

подход, предложенный Л. Прандтлем. Этот подход заключается в использовании для описания основного потока вдали от тела уравнений Эйлера, а пристенных течений – уравнений пограничного слоя и сращивании этих двух решений каким-либо способом в некоторой области пространства.

Таким образом, на основе анализа уравнений Навье–Стокса, методов построения их решений и областей применения сделан вывод, что для значительного сокращения объема вычислений и хранимой для этих целей информации на ЭВМ целесообразно использовать для моделирования экологических процессов в атмосфере уравнения Эйлера с источниками членами.

4.2. Математическая модель экологических процессов в атмосфере

В результате структурного анализа перечисленных экологических процессов в атмосфере (выброса, смешения и распространения газовой примеси в атмосфере; истечения газовой примеси в атмосферу, взрыва газообразной примеси в атмосфере с учетом химического взаимодействия, в том числе в многосвязных областях со сложным рельефом местности, с учетом термодинамических свойств газов, а также алгоритма численного моделирования этих процессов, декомпозиции полной математической модели процесса) выявлено, что основное влияние на процесс оказывает интенсивность конвективного и турбулентного переноса компонент примеси. Таким образом, для описания процессов смешения многокомпонентного газа в рассматриваемом случае достаточно использовать усеченные уравнения, полученные из уравнений Навье–Стокса путем отбрасывания вязких и диффузных членов, – приближение Эйлера с источниками членами.

Целью данной работы является разработка упрощенной математической модели, адекватно описывающей нестационарные процессы смешения реагирующих газов с воздухом, их горения (с учетом химического взаимодействия компонент смесей) и дальнейшего рассеяния смеси в открытом пространстве или замкнутое помещение с принудительной (или естественной) вентиляцией, а также алгоритма численного моделирования этих процессов.

В результате структурного анализа такого течения и декомпозиции полной математической модели газодинамического процесса принято в качестве предположения допущение о том, что основное влияние на процесс оказывает конвективный обмен массой, импульсом и энергией. Таким образом, для описания процессов смешения трехкомпонентного газа в рассматриваемом случае достаточно использовать усеченные уравнения Навье–Стокса, полученные путем отбрасывания вязких членов (приближение Эйлера с использованием источников членов).

Расчетной областью Ω является параллелепипед с прямолинейными образующими (рис. 4.1), расположенный в правой декартовой системе ко-

ординат (X, Y, Z), с основанием в плоскости XOZ (ось Y ориентирована в направлении, противоположном действию сил тяжести Земли). Расчетная область разбивается на пространственные ячейки, причем размеры граней подбираются в соответствии с характерным размером особенностей расчетной области (шероховатостью обтекаемой поверхности, размерностью обтекаемых объектов).

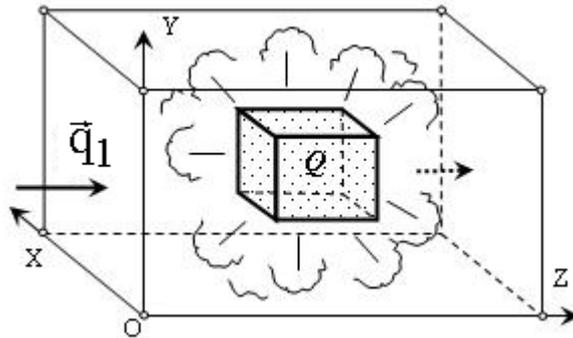


Рис. 4.1. Расчетная схема смешения реагирующих газов с воздухом, их горения (с учетом химического взаимодействия компонент смесей) и дальнейшего рассеяния смеси

Полная система уравнений, описывающая нестационарное трехмерное течение трехкомпонентной смеси газов, в данной постановке такова [22, 23, 135]:

$$\frac{\partial \vec{a}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{b}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{c}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{d}}{\partial z} = \rho \vec{f}, \quad (4.1)$$

где \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} , \vec{d} , \vec{f} – вектор-столбцы вида:

$$\vec{a} = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, E]^T; \quad (4.2)$$

$$\vec{b} = [\rho u, P + \rho u^2, \rho uv, \rho u, (E + P)u]^T; \quad (4.3)$$

$$\vec{c} = [\rho v, \rho v, P + \rho v^2, \rho vw, (E + P)v]^T; \quad (4.4)$$

$$\vec{d} = [\rho w, \rho w, \rho w, P + \rho w^2, (E + P)w]^T; \quad (4.5)$$

$$\vec{f} = [0, 0, -g, 0, -gv + e_s/\rho]^T. \quad (4.6)$$

Здесь t – время; u, v, w – составляющие вектора скорости \vec{q} ; P, ρ – давление и плотность; E – полная энергия единицы объема смеси газов,

$$E = \rho(e + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)); \quad (4.7)$$

где e – внутренняя энергия единицы массы газа; компоненты вектора \vec{f} – суть проекции распределенных объемных источников; g – ускорение свободного падения; e_s – интенсивность тепловыделения в единице объема газа вследствие химической реакции.

Закон переноса компоненты смеси (горючий газ, воздух, продукты сгорания) с учетом скорости турбулентной диффузии имеет вид [22, 23, 135]

$$\frac{\partial(\rho Q_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Q_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Q_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w Q_i)}{\partial z} = \rho_{Q_{it}} + \rho_{Q_{is}}, \quad (4.8)$$

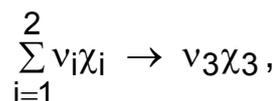
где Q_i – относительная массовая плотность i -й компоненты смеси, $i = 1 \dots 3$ (отношение плотности газообразного вещества компоненты к плотности смеси); 1 – горючее; 2 – воздух; 3 – продукты сгорания; $\rho_{Q_{it}}$ – интенсивность изменения плотности компоненты смеси вследствие турбулентной диффузии в соответствии с законом Фика $\rho_{Q_{it}} = \text{div}(\rho \mathfrak{D} \text{grad} Q_i)$ (коэффициент турбулентной диффузии \mathfrak{D} определялся по методике, предложенной М.Е. Берляндом [24, 25]); $\rho_{Q_{is}}$ – интенсивность изменения плотности компоненты смеси вследствие химической реакции.

Система уравнений (4.1) – (4.8) является незамкнутой. Дополним ее уравнениями, определяющими теплофизические свойства смеси:

$$\mu = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \frac{Q_i}{\mu_i}}; \quad C_p = \sum_{i=1}^3 Q_i (C_{p_i}); \quad C_v = \sum_{i=1}^3 Q_i (C_{v_i}); \quad \sum_{i=1}^3 Q_i = 1; \quad k = \frac{C_p}{C_v}.$$

Для идеального политропного газа величина e связана с P и ρ смеси зависимостью $e = \frac{P}{(k-1)\rho}$.

Интенсивность изменения плотности горючего $\rho_{Q_{1s}}$ вследствие химической реакции определялась как произведение молекулярной массы горючего μ_1 на скорость его мольного изменения w_1 . Рассматривалась химическая реакция – «брутто»:



где ν_i – стехиометрические коэффициенты; χ_i – химические вещества.

Скорость мольного изменения w_1 определялась по формуле

$$w_1 = -\nu_1 A_1 T^{\beta_1} \exp[-E_1/R_{yH} T] \prod_{i=1}^2 [\chi_i]^{\nu_i'},$$

где $A_1, \beta_1, E_1, \nu_1', \nu_2'$ – параметры, полученные на основе обобщения экспериментальных данных [11, 12]; $[\chi_i]$ – мольная концентрация i -й компоненты смеси, $[\chi_i] = \frac{\rho_{Q_{is}}}{\mu_i \nu_i}$. Интенсивность изменения плотности продуктов сгорания $\rho_{Q_{3s}}$ устанавливалась на основе закона движущихся масс:

$$\frac{\rho_{Q_{1s}}}{\mu_1 \nu_1} = \frac{\rho_{Q_{2s}}}{\mu_2 \nu_2} = -\frac{\rho_{Q_{3s}}}{\mu_3 \nu_3}.$$

Интенсивность тепловыделения в единице объема газа вследствие химической реакции e_s определялась по формуле

$$e_s = -\xi H_{u_1} \rho Q_{1s},$$

где ξ – коэффициент полноты сгорания; H_{u_1} – низшая теплота сгорания горючего.

При постановке граничных условий полагается, что расходная составляющая скорости не превосходит скорость звука. Граничные условия на входе будем задавать на поверхностях тех граней, примыкающих к границам расчетной области, через которые в расчетную область поступает атмосферный воздух. Набегающий поток на входе определяется величинами:

– полной энтальпии

$$I_{00} = \frac{k}{k-1} \frac{P}{\rho} + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}; \quad (4.9)$$

– функции энтропии

$$S_0 = \frac{P}{\rho^k}; \quad (4.10)$$

– направлением вектора скорости потока (углами $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$);

– относительной массовой плотностью горючего Q_1 ($Q_1 \leq 1$), если поступает газообразное вещество компоненты смеси, например метан).

Параметры потока на входе определяются из равенств (4.9), (4.10) с учетом заданных $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ и привлечением соотношения для «левого» инварианта Римана [268]. На непроницаемых участках, ограничивающих расчетную область поверхностей, выполняются условия «непротекания»: $q_n = 0$, где \vec{n} – вектор нормали к рассматриваемой границе. Граничные условия на выходе будем задавать на поверхностях тех граней конечно-разностных ячеек, которые примыкают к границам расчетной области и через которые предполагается вытекание или втекание смеси. В выходных областях, кроме атмосферного давления P_{air} , задаваемого либо взятого из эксперимента, использовались соотношения для «правого» инварианта Римана [268]. Задавались «мягкие» граничные условия для искомым относительных массовых плотностей компонент на всех ограничивающих расчетную область поверхностях.

В начальный момент времени во всех «газообразных» ячейках расчетной области принимают параметры окружающей среды. В ячейках, занимаемых облаком газообразной компоненты смеси, которое образовалось в результате мгновенного выброса, относительную массовую концентрацию компоненты смеси принимают равной $Q_1 \leq 1$. В ячейках с испарением или истечением газа задается закон изменения расхода компоненты смеси.

Предполагалось, что горение происходит в объеме расчетной области, занимаемом горючей смесью, с концентрацией горючего в диапазоне между минимальным и максимальным концентрационными пределами воспламеняемости $Q_{1\min} \leq Q_1 \leq Q_{1\max}$. Величины $Q_{1\min}$, $Q_{1\max}$ задавались на основе обобщения экспериментальных данных [222].

4.2.1. Учет распыления капель (частиц пыли твердых фракций)

Качество распыла, как известно, характеризуется интегральными и дифференциальными кривыми распределения объемов (числа, поверхности) капель по их диаметрам и различными понятиями среднего диаметра капель. В большинстве случаев используемая в технике распыленная жидкость состоит из капель различных размеров, т.е. имеет полидисперсный характер. Для описания кривых распределения капель по размерам предложены различные зависимости. Наибольшее распространение нашло уравнение Розина–Раммлера [124]

$$P = 1 - \exp(-(d/d_+)^n).$$

Здесь P – объемная доля капель, диаметр которых меньше d ; d_+ – характерный размер или средний диаметр, соответствующий определенному значению $P = 0,3679$; n – константа распределения, характеризующая степень неоднородности распыла (обычно $2 \leq n \leq 4$). Тогда плотность распределения капель по диаметрам примет вид

$$\rho(d/d_+) = n(d/d_+)^{n-1} \exp(-(d/d_+)^n).$$

4.2.2. Учет влияния аэродинамического сопротивления капель (частиц пыли твердых фракций) на параметры движения газовой смеси

Определим силу сопротивления, действующую на каплю (частицу пыли):

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -C_d \frac{\rho q^2}{2} \sigma_k \frac{\vec{q}}{|\vec{q}|},$$

где $\sigma_k = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь поверхности; C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления; q – скорость потока. Если капля сохраняет сферическую форму, то для определения C_d можно рекомендовать соотношение [297]

$$C_d = 24/Re + 4,4/\sqrt{Re} + 0,35,$$

где $Re = \frac{\rho q d}{\mu}$ – число Рейнольдса. Тогда осредненная по диаметрам капля сила аэродинамического сопротивления для выбранного контрольного объема определяется по формуле

$$\bar{F}_{\text{тр}} = N_k \sum_{i=1}^I \rho(d_i) \bar{F}_{\text{тр}}(d_i),$$

где $N_k = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}} \tau}{m \rho_{\text{H}_2\text{O}} \sum_{i=1}^I \rho(d_i) V_{ki}}$ – количество капель в контрольном объеме,

$G_{\text{H}_2\text{O}}$ – общий расход воды (предполагается, что вода непрерывно подается в расчетную область); τ – шаг по времени; m – количество контрольных объемов в области с источниками (капли, частиц пыли твердых фракций); $V_{ki} = (\pi/6)d_i^3$ – объем капли.

Количество частиц твердых фракций в контрольном объеме таково:

$$N_k = \frac{\rho_{C+} \Delta V}{\rho_C \sum_{i=1}^I \rho(d_i) V_{ki}},$$

где ρ_{C+} – концентрация пыли во взвешенном состоянии; ΔV – контрольный объем; ρ_C – плотность вещества твердой фракции.

Учет влияния аэродинамического сопротивления капель (частиц пыли твердых фракций) на параметры движения газовой смеси осуществлялся посредством введения в уравнения движения осредненной объемной силы сопротивления: $\bar{f}_{\text{тр}} = \frac{1}{\rho} \bar{F}_{\text{тр}} / \Delta V$. При этом предполагалось, что сумма удельной мощности сил сопротивления и удельной диссипируемой мощности равна нулю: $(\rho \bar{f}_{\text{тр}}, \bar{q}) + N_d = 0$.

4.2.3. Учет влияния тепловыделения вследствие фазового перехода при кипении капель (химической реакции горения частиц пыли твердых фракций) на параметры движения газовой смеси

Определим интенсивность изменения плотности примеси вследствие фазового перехода при кипении капель воды:

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}s} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}}}{m \Delta V}.$$

Интенсивность изменения плотности примеси вследствие химической реакции горения такова:

$$\rho_{Cs} = \frac{G_C}{m \Delta V},$$

где G_C – общее изменение в единицу времени массы частиц пыли твердых фракций вследствие химической реакции горения.

Будем исходить из того, что известен закон, согласно которому время горения одной частицы зависит от начальной массы этой частицы:

$$t_i = kd_i^2 = k \left(\frac{6M_{0i}}{\pi \rho_C} \right)^{\frac{2}{3}},$$

где $k = 6,14 \cdot 10^6$, $M_{0i} = \rho_C V_{ki}$. Тогда согласно известным из математического анализа и теории обыкновенных дифференциальных уравнений преобразованиям может быть получен закон определения массы частицы в произвольный момент времени химической реакции горения:

$$M_i = [M_{0i}^{2/3} - 1,06 \cdot 10^{-7} \rho_C^{2/3} \cdot t]^{3/2},$$

а зависимость изменения в единицу времени массы частиц пыли твердых фракций вследствие химической реакции горения имеет вид

$$G_{Ci} = 1,6 \cdot 10^{-7} \rho_C^{2/3} (M_{0i}^{2/3} - 1,06 \cdot 10^{-7} \rho_C^{2/3} \cdot t)^{1/2},$$

где t – текущее время.

Общее изменение в единицу времени массы частиц пыли твердых фракций вследствие химической реакции горения может быть определено по формуле

$$G_C = mN_k \sum_{i=1}^I \rho(d_i) G_{Ci}.$$

Учет влияния фазового перехода при кипении капель воды (химической реакции горения частиц пыли твердых фракций) на параметры движения газовой смеси осуществлялся посредством введения в уравнение энергии интенсивностей тепловыделения в контрольном объеме:

$$e_{H_2O_s} = -r(P)\rho_{H_2O_s}, \quad e_{C_s} = \xi H_{uC} \rho_{C_s},$$

где $r(P)$ – удельная теплота парообразования; ξ – коэффициент полноты сгорания; H_{uC} – низшая теплота сгорания.

Таким образом, предложена математическая модель смешения газов, которая описывает экологические процессы в атмосфере, что позволяет прогнозировать поля температуры, давления и концентрации вещества примеси в рассматриваемом объеме.

4.3. Метод представления и численное решение задач смешения газов в атмосфере

Для приведения системы уравнений (4.1) – (4.10) к безразмерному виду все линейные размеры отнесены к некоторому характерному размеру задачи l^* , в качестве которого выбрано расстояние от обтекаемой поверхности, кратное размеру облака примеси; скорость и плотность отнесены соответственно к критической скорости a^* и критической плотности ρ^* на входе; давление – к $\rho^* a^{*2}$, удельные энтальпия и внутренняя энергия – к

a_*^2 , время – к отношению $\frac{l_*}{a_*}$. Для идеального политропного газа величина

е связана с P и ρ смеси зависимостью $e = \frac{P}{(k-1)\rho}$. Здесь все величины

безразмерные. Индекс при идентификаторах безразмерных физических величин в приведенных выше и далее уравнениях опущен.

Векторное уравнение (4.1) является следствием законов сохранения массы, импульса и энергии, которые могут быть представлены в интегральной форме для каждой расчетной ячейки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V a dV + \iint_{\sigma} \hat{A} d\sigma = \iiint_V \rho f dV, \quad (4.11)$$

где V – объем элементарной расчетной ячейки; σ – ограничивающая поверхность данной ячейки, которая имеет внешнюю нормаль \vec{n} ($\vec{\sigma} = \sigma \vec{n}$); \hat{A} – тензор плотности потока консервативных переменных \vec{a} , столбцами которого являются векторы \vec{b} , \vec{c} и \vec{d} соответственно.

Закон переноса компоненты смеси (3.8) может быть также представлен в интегральной форме для каждой расчетной ячейки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho Q dV + \iint_{\sigma} \rho Q d\sigma = \iiint_V (\rho_{Q_t} + \rho_{Q_s}) dV. \quad (4.12)$$

Уравнения (4.11), (4.12) допускают возникновение и существование поверхностей разрыва двух видов – ударных волн и тангенциальных разрывов. Функции, удовлетворяющие уравнениям (4.11), (4.12), можно рассматривать в качестве обобщенных решений уравнений газовой динамики. Использование интегральных законов сохранения в качестве исходных для построения разностных уравнений обеспечивает нахождение разрывных решений без выделения разрывов.

Совокупность газодинамических параметров во всех ячейках в момент времени t^n представляет собой известное решение на временном слое с индексом n . Параметры в момент времени $t^{n+1} = t^n + \tau$ (на слое $n+1$) рассчитывались посредством применения явных разностных аппроксимаций для соотношений (4.11), (4.12) в рамках интегро-интерполяционного метода С.К. Годунова [268] первого порядка точности. На первом этапе непрерывное распределение параметров заменяется кусочно-постоянными среднеинтегральными значениями в каждой расчетной ячейке. При этом границы ячейки представляют собой неустойчивые поверхности произвольного разрыва, которые распадаются на устойчивые волновые элементы – ударную волну, контактную поверхность и волну разрежения. Для

каждого такого разрыва определяются потоки массы, импульса и энергии через грани газовых ячеек. Устойчивость конечно-разностной схемы обеспечивается за счет выбора величины шага по времени τ в соответствии с условием Куранта.

При численном моделировании расчетную область Ω разбивают тремя семействами поверхностей на конечное число элементарных объемов (ячеек). Определим положение любой ячейки в пределах построенной расчетной сетки набором индексов i, j, k ($i = 0 \dots L; j = 0 \dots M; k = 0 \dots N$). Сопоставим с параметрами рассматриваемой системы в каждой ячейке сетки тройку полуцелых чисел $(i - 1/2, j - 1/2, k - 1/2)$, на каждой грани – одно целое и два полуцелых числа, причем целый индекс характеризует поверхность, нормаль к которой ориентирована в направлении соответствующей оси декартовой системы координат. Например, тройка чисел $(i - 1/2, j, k - 1/2)$ соответствует грани, нормаль к которой ориентирована в направлении оси Y .

Для построения разностной схемы применим интегральные законы сохранения (4.11), (4.12) [266, 268] к элементарному объему с номером $(i - 1/2, j - 1/2, k - 1/2)$. Параметры смеси газов для фиксированного времени t^n внутри каждой ячейки считают постоянными, осредненными по ее объему и изменяющимися лишь при переходе от одной ячейки к другой. При вычислении соответствующих поверхностных интегралов полагали, что газодинамические величины, порождающие потоки через боковые грани, остаются постоянными в течение рассматриваемого интервала времени τ и определяются из расчета одномерной автомодельной задачи о распаде произвольного разрыва газодинамических параметров в ячейках, для которых данная грань является общей [268]. Совокупность газодинамических параметров во всех ячейках в момент времени t^n представляет собой известное решение на временном слое с индексом n . Параметры в момент времени $t^{n+1} = t^n + \tau$ (на слое $n + 1$) рассчитывали посредством применения явных разностных аппроксимаций для соотношений (4.11), (4.12) в рамках интегро-интерполяционного метода С.К. Годунова [268], согласно которому решение находилось по такой схеме:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{i-1/2, j-1/2, k-1/2}^{n+1} &= \bar{a}_{i-1/2, j-1/2, k-1/2}^n - \\ &- \tau [(\hat{A}\bar{\sigma})_{i-1, j-1/2, k-1/2} + (\hat{A}\bar{\sigma})_{i, j-1/2, k-1/2} + \\ &+ (\hat{A}\bar{\sigma})_{i-1/2, j-1, k-1/2} + (\hat{A}\bar{\sigma})_{i-1/2, j, k-1/2} + \end{aligned}$$

$$+ (\widehat{A}\bar{\sigma})_{i-1/2,j-1/2,k-1} + (\widehat{A}\bar{\sigma})_{i-1/2,j-1/2,k+1} / \\ /V_{i-1/2,j-1/2,k-1/2} + \tau(\rho\bar{f})_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}; \quad (4.13a)$$

$$(\rho Q)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^{n+1} = (\rho Q)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^n - \\ - \tau[(\rho Q\bar{q}\bar{\sigma})_{i-1,j-1/2,k-1/2} + (\rho Q\bar{q}\bar{\sigma})_{i,j-1/2,k-1/2} + \\ + (\rho Q\bar{q}\bar{\sigma})_{i-1/2,j-1,k-1/2} + (\rho Q\bar{q}\bar{\sigma})_{i-1/2,j,k-1/2} + \\ + (\rho Q\bar{q}\bar{\sigma})_{i-1/2,j-1/2,k-1} + (\rho Q\bar{q}\bar{\sigma})_{i-1/2,j-1/2,k}] / \\ /V_{i-1/2,j-1/2,k-1/2} + \tau(\rho Q_t + \rho Q_s)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}, \quad (4.13b)$$

где $(\widehat{A}\bar{\sigma})_{l,m} = (\widehat{A}_{l,1}\alpha_m + \widehat{A}_{l,2}\beta_m + \widehat{A}_{l,3}\gamma_m)\sigma_m$, $l=1...5$; $\widehat{A}_{l,j}$ – компоненты тензора \widehat{A} , столбцами которого являются векторы $\vec{v}, \vec{c}, \vec{d}$ системы уравнений (4.1) [23]; $\bar{\sigma}_m = \sigma_m \bar{n}$; $\bar{n} = (\alpha, \beta, \gamma)$ – вектор единичной нормали к боковой грани σ_m ; m – тройка чисел, определяющая боковую грань m -й ячейки с номером $(i - 1/2, j - 1/2, k - 1/2)$.

По аналогии с работой [268] выражения для потоков векторов и тензоров через боковые грани элементарного объема будем называть «большими» величинами в отличие от «малых» величин – кусочно-постоянных значений газодинамических параметров в ячейках. Таким образом, в соответствии с уравнениями (4.13а), (4.13б) для определения малых величин $(\bar{a}, Q)^{n+1}$ в момент времени t^{n+1} для ячейки с номером $(i - 1/2, j - 1/2, k - 1/2)$ необходимо знать малые величины $(\bar{a}, Q)^n$ в момент времени t^n в этой же ячейке и большие величины этих параметров на боковых гранях рассматриваемой ячейки.

Приведем формулы для нахождения площадей граней элементарных объемов. Учитывая, что порядок аппроксимации разностной схемы не выше первого [268], определяем площади граней с точностью до величины второго порядка малости относительно длин шагов разностного разбиения:

$$\sigma_x = \frac{h'_y + h''_y}{2\gamma_x} h_z, \quad \sigma_y = \frac{(h'_z + h''_z)(h'_x + h''_x)}{4\beta_y}, \quad \sigma_z = \frac{h'_y + h''_y}{2\alpha_z} h_x, \quad (4.14)$$

где h_x, h_y, h_z – шаги разностной сетки в направлении координатных осей X, Y, Z .

Один штрих и два штриха соответственно обозначают меньший и больший номера ребер, ограничивающих боковую грань.

Объем ячейки можно представить в виде

$$V = \sigma_y \beta_y \langle h_y \rangle, \quad (4.15)$$

где $\langle h_y \rangle$ – средний для ячейки шаг в направлении y . Нижние индексы в формулах (4.14) и (4.15) определяют принадлежность используемых параметров к поверхностям, нормали к которым ориентированы в направлении соответствующих осей выбранной системы координат.

Если вместо декартовой системы выбрать цилиндрическую (x, r, φ) , то, используя (4.13), придем к разностным соотношениям:

$$\begin{aligned}
 \rho_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^{n+1} &= \rho_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^n - \tau(A_{i,j-1/2,k-1/2} - A_{i-1,j-1/2,k-1/2} + \\
 &+ B_{i-1/2,j,k-1/2} - B_{i-1/2,j-1,k-1/2} + C_{i-1/2,j-1/2,k} - C_{i-1/2,j-1/2,k-1}) / \\
 &/ V_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}; \\
 (\rho u)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^{n+1} &= (\rho u)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^n - \tau[(Pr h_r h_\varphi + Au)_{i,j-1/2,k-1/2} - \\
 &- (Pr h_r h_\varphi + Au)_{i,j-1/2,k-1/2} + (Pr h_r h_\varphi + Bu)_{i-1/2,j,k-1/2} - \\
 &- (Pr h_r h_\varphi + Bu)_{i-1/2,j-1,k-1/2} + (Pr h_r h_\varphi + Cu)_{i-1/2,j-1/2,k} - \\
 &- (Pr h_r h_\varphi + Cu)_{i-1/2,j-1/2,k-1}] / V_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}; \\
 (\rho v)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^{n+1} &= (\rho v)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^n - \tau[(Av)_{i,j-1/2,k-1/2} - \\
 &- (Av)_{i-1,j-1/2,k-1/2} + (Pr h_r h_\varphi + Bv)_{i-1/2,j,k-1/2} - \\
 &- (Pr h_r h_\varphi + Bv)_{i-1/2,j-1,k-1/2} + (Cv)_{i-1/2,j-1/2,k} - (Cv)_{i-1/2,j-1/2,k-1}] / \\
 &/ V_{i-1/2,j-1/2,k-1/2} + \tau(-\rho g \cos \varphi + (P + \rho w^2)/r)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^n; \\
 (\rho w)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^{n+1} &= (\rho w)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^n - \tau[(Aw)_{i,j-1/2,k-1/2} - \\
 &- (Aw)_{i-1,j-1/2,k-1/2} + (Pr h_x h_r^0 + Bw)_{i-1/2,j,k-1/2} - (Pr h_x h_r^0 + Bw)_{i-1/2,j-1,k-1/2} + \\
 &+ (Pr h_x h_r + Cw)_{i-1/2,j-1/2,k} - (Pr h_x h_r + Cw)_{i-1/2,j-1/2,k-1}] / V_{i-1/2,j-1/2,k-1/2} + \\
 &+ \tau(\rho g \sin \varphi - \rho w/r)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^n;
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

$$\begin{aligned}
& [\rho(2e + q^2)]_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^{n+1} = [\rho(2e + q^2)]_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^n - \\
& - \tau\{[A(2l + q^2)]_{i,j-1/2,k-1/2} - [A(2l + q^2)]_{i-1,j-1/2,k-1/2} + [B(2l + q^2)]_{i-1/2,j,k-1/2} - \\
& - [B(2l + q^2)]_{i-1/2,j-1,k-1/2} + [C(2l + q^2)]_{i-1/2,j-1/2,k} - [C(2l + q^2)]_{i-1/2,j-1/2,k-1}\} / \\
& / V_{i-1/2,j-1/2,k-1/2} + \tau(\rho g w \sin \varphi - \rho g v \cos \varphi + e_S)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}; \\
& (\rho Q)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^{n+1} = (\rho Q)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}^n - \tau[(AQ)_{i,j-1/2,k-1/2} - \\
& - (AQ)_{i-1,j-1/2,k-1/2} + (BQ)_{i-1/2,j,k-1/2} - (BQ)_{i-1/2,j-1,k-1/2} + \\
& + (CQ)_{i-1/2,j-1/2,k} - (CQ)_{i-1/2,j-1/2,k-1}] / V_{i-1/2,j-1,k-1/2} + \\
& + \tau(\rho Q_t + \rho Q_s)_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}.
\end{aligned}$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
A &= \rho u r h_r h_\varphi; \\
B &= \rho(u r h_r h_\varphi + v r h_x h_\varphi + w h_x h_r); \\
C &= \rho(u r h_r h_\varphi + w h_x h_r); \\
r_{i,j-1/2,k-1/2} &= (r_{i,j,k} + r_{i,j-1,k} + r_{i,j,k-1} + r_{i,j-1,k-1})/4; \\
r_{i-1/2,j,k-1/2} &= (r_{i,j,k} + r_{i-1,j,k} + r_{i,j,k-1} + r_{i-1,j,k-1})/4; \\
r_{i-1/2,j-1/2,k} &= (r_{i,j,k} + r_{i-1,j,k} + r_{i,j-1,k} + r_{i-1,j-1,k})/4; \\
(h_r)_{i,j-1/2,k-1/2} &= (r_{i,j,k} + r_{i,j,k-1} - r_{i,j-1,k} - r_{i,j-1,k-1})/2; \\
(h_r)_{i-1/2,j,k-1/2} &= (r_{i-1,j,k} + r_{i-1,j,k-1} - r_{i,j,k} - r_{i,j,k-1})/2; \\
(h_r)_{i-1/2,j-1/2,k} &= (r_{i,j,k} + r_{i-1,j,k} - r_{i,j-1,k} - r_{i-1,j-1,k})/2; \\
(h_r^0)_{i-1/2,j,k-1/2} &= (r_{i,j,k-1} + r_{i-1,j,k-1} - r_{i,j,k} - r_{i-1,j,k})/2.
\end{aligned}$$

Соответствующие величины для других граней элементарного объема, которым отвечают тройки чисел $(i - 1, j - 1/2, k - 1/2)$, $(i - 1/2, j - 1, k - 1/2)$ и $(i - 1/2, j - 1/2, k - 1)$, вводят аналогичным образом. Прочие переменные имеют такой смысл: $V_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}$ – объем ячейки; все параметры на гранях находят из решения автомодельной задачи о распаде произвольного разрыва; $l = \frac{k}{k-1} \frac{P}{\rho}$ – энтальпия; h_φ – шаг по угловой координате φ ; остальные обозначения совпадают или аналогичны ранее принятым.

4.3. Расчет распада разрыва

Описание разностной схемы завершается алгоритмом расчета больших величин, т.е. потоков массы, импульса и энергии через грани ячеек разностной сетки. Алгоритм строят на основании решения задачи о распаде произвольного разрыва [268].

Выберем два набора газодинамических параметров, характеризующих течение в двух соседних ячейках, и по ним рассчитаем большие величины на их общей грани. Припишем этим наборам условно знаки «+» и «-», воспользуемся разложением векторов скорости \vec{q}^+ и \vec{q}^- на нормальную и касательную составляющие к рассматриваемой грани:

$$\begin{aligned} \vec{q} &= \vec{q}_n + \vec{q}_i, \quad \vec{n} = (\alpha, \beta, \gamma); \\ \vec{q}_n &= (\alpha q_n, \beta q_n, \gamma q_n), \quad q_n = \alpha u + \beta v + \gamma w; \\ \vec{q}_i &= \vec{q} - \vec{q}_n, \quad \vec{q}_i = (u - \alpha q_n, v - \beta q_n, w - \gamma q_n). \end{aligned} \quad (4.17)$$

В результате распада разрыва вырабатываются три волны, из которых две могут быть либо ударными, либо волнами разрежения, а одна представляет собой контактный разрыв. Давление P_m и нормальная компонента скорости q_{mn} на контактном разрыве непрерывны и могут быть вычислены в результате итерационного процесса, описанного в работе [268]. Приведем формулы расчета одномерного распада разрыва для трехмерного течения.

Введем в рассмотрение массовые скорости волн:

а) для левой (правой) ударной волны (если она таковой является)

$$a^{-,+} = \left(\sqrt{\rho \left[\frac{k+1}{2} P_m + \frac{k-1}{2} P \right]} \right)^{-,+}; \quad (4.18)$$

б) для левой (правой) волны разрежения (если она таковой является)

$$a^{-,+} = \left(\frac{\frac{k-1}{2k} \rho c \frac{1 - \frac{P_m}{P}}{1 - \left(\frac{P_m}{P} \right)^{\frac{k-1}{2k}}}}{\right)^{-,+}. \quad (4.19)$$

После этого итерационный процесс конструируется так. Пусть P_m^{i-1} – полученное приближение для величины P_m (для первой итерации P_m^0 задается). Тогда вычисляем величину $(a^-)^{i-1} = a^-(P_m^{i-1}, P^-, \rho^-, k^-)$ по формуле (4.18), если $P_m^{i-1} \geq P^-$ или если $P_m^{i-1} < P^-$, а величину $(a^+)^{i-1} = a^+(P_m^{i-1}, P^+, \rho^+, k^+)$ – по формуле (4.18), если $P_m^{i-1} \geq P^+$, или по формуле (4.19), если $P_m^{i-1} < P^+$.

Затем новое приближение P_m^i определяется формулой

$$P_m^i = P_m^{i-1} - \frac{f(P_m^i, P^-, \rho^-, k^-) + f(P_m^i, P^+, \rho^+, k^+) - (q_n^- - q_n^+)}{f'(P_m^i, P^-, \rho^-, k^-) + f'(P_m^i, P^+, \rho^+, k^+)}, \quad (4.20)$$

$$\text{где } f(P_m, P, \rho, k) = \begin{cases} \frac{P_m - P}{\rho c \sqrt{\frac{k+1}{2k} \pi + \frac{k-1}{2k}}}, & P_m \geq P; \\ \frac{2}{k-1} c \left(\pi \frac{k-1}{2k} - 1 \right), & P_m < P; \end{cases}$$

$$\pi = \frac{P_m}{P}; c = \sqrt{k \frac{P}{\rho}};$$

$$f'(P_m, P, \rho, k) = \begin{cases} \frac{(k+1)\pi + (3k-1)}{4k\rho c \sqrt{\left(\frac{k+1}{2k} \pi + \frac{k-1}{2k}\right)^3}}, & P_m \geq P; \\ \frac{1}{kP_m} c \pi \frac{k-1}{2k}, & P_m < P. \end{cases}$$

В качестве одного из возможных алгоритмов расчета начального приближения P_m^0 можно рекомендовать «звуковой распад разрыва», из которого определяется

$$P_m^0 = \frac{P^- \rho^+ c^+ + P^+ \rho^- c^- + (q_n^- - q_n^+) \rho^- c^- \rho^+ c^+}{(\rho c)^- + (\rho c)^+}. \quad (4.21)$$

Для завершения описания алгоритма решения задачи о распаде разрыва остается привести формулы для других величин, описывающих возможные конфигурации. Все они легко находятся после того, как вычислено давление P_m на контактном разрыве. Тогда скорость контактного разрыва

$$q_{mn} = \frac{a^- q_n^- + a^+ q_n^+ + P^- - P^+}{a^- + a^+}. \quad (4.22)$$

Если левая волна является ударной ($P_m \geq P^-$), то ее скорость

$$D^- = q_n^- - \frac{a^-}{\rho^-}, \quad (4.23)$$

а плотность R^- в области слева от контактного разрыва определяют по адиабате Гюгонио:

$$R^- = \frac{\rho^- a^-}{a^- - \rho^- (q_n^- - q_{mn})}. \quad (4.24)$$

Если левая волна является волной разрежения ($P_m < P^-$), то скорость крайних характеристик, ее ограничивающих, вычисляют по формуле

$$D^- = q_n^- - c^-, \quad (4.25)$$

а плотность

$$R^- = \frac{k^- P_m}{\left[c^- + \frac{k^- - 1}{2} (q_n^- - q_{nm}) \right]^2}. \quad (4.26)$$

Аналогичные формулы выписывают для правой волны. Если она является ударной, то

$$D^+ = q_n^+ + \frac{a^+}{q^+}, \quad R^+ = \frac{\rho^+ a^+}{a^+ + \rho^+ (q_n^+ - q_{nm})}, \quad (4.27)$$

а если – волной разрежения, то

$$D^+ = q_n^+ + c^+; \quad R^+ = \frac{k^+ P_m}{\left[c^+ - \frac{k^+ - 1}{2} (q_n^+ - q_{nm}) \right]^2}. \quad (4.28)$$

Таким образом, описан алгоритм построения обобщенного решения газодинамической задачи о распаде разрыва.

Используя соотношения (4.17) – (4.28), приходим к параметрам автомодельного решения на грани ($i, j - 1/2, k - 1/2$).

Рассмотрим три различных случая.

1. $D_{i,j-1/2,k-1/2}^- > 0$ и $D_{i,j-1/2,k-1/2}^+ > 0$, тогда

$$\begin{aligned} P_{i,j-1/2,k-1/2} &= P_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}, \\ \rho_{i,j-1/2,k-1/2} &= \rho_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}, \\ Q_{i,j-1/2,k-1/2} &= Q_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}, \\ \bar{q}_{n_{i,j-1/2,k-1/2}} &= \bar{q}_{n_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}}, \\ \bar{q}_{t_{i,j-1/2,k-1/2}} &= \bar{q}_{t_{i-1/2,j-1/2,k-1/2}}. \end{aligned}$$

2. $D_{i,j-1/2,k-1/2}^- < 0$ и $D_{i,j-1/2,k-1/2}^+ < 0$, тогда

$$\begin{aligned} P_{i,j-1/2,k-1/2} &= P_{i+1/2,j-1/2,k-1/2}, \\ \rho_{i,j-1/2,k-1/2} &= \rho_{i+1/2,j-1/2,k-1/2}, \\ Q_{i,j-1/2,k-1/2} &= Q_{i+1/2,j-1/2,k-1/2}, \\ \bar{q}_{n_{i,j-1/2,k-1/2}} &= \bar{q}_{n_{i+1/2,j-1/2,k-1/2}}. \end{aligned}$$

$$\bar{q}_{t, j-1/2, k-1/2} = \bar{q}_{t, i+1/2, j-1/2, k-1/2} \cdot$$

$$3. \quad D_{i, j-1/2, k-1/2}^- \cdot D_{i, j-1/2, k-1/2}^+ < 0, \text{ тогда } P_{i, j-1/2, k-1/2} = P_{m, i, j-1/2, k-1/2} \cdot$$

Компоненты скорости и плотность определяют в зависимости от знака $q_{mn, i, j-1/2, k-1/2}$:

$$a) \quad q_{mn, i, j-1/2, k-1/2} > 0, \text{ в этом случае}$$

$$P_{i, j-1/2, k-1/2} = P_{i-1/2, j-1/2, k-1/2} \times \frac{((k^- + 1)P)_{i, j-1/2, k-1/2} + ((k - 1)P)_{i-1/2, j-1/2, k-1/2}}{((k^- - 1)P)_{i, j-1/2, k-1/2} + ((k + 1)P)_{i-1/2, j-1/2, k-1/2}},$$

$$k_{i, j-1/2, k-1/2}^- = k_{i-1/2, j-1/2, k-1/2},$$

$$Q_{i, j-1/2, k-1/2} = Q_{i-1/2, j-1/2, k-1/2},$$

$$\bar{q}_{n, i, j-1/2, k-1/2} = q_{mn, i, j-1/2, k-1/2} \bar{n},$$

$$\bar{q}_{t, i, j-1/2, k-1/2} = \bar{q}_{t, i-1/2, j-1/2, k-1/2};$$

проекции скоростей на координатные оси с учетом (4.17) следующие:

$$U_{i, j-1/2, k-1/2} = U_{i-1/2, j-1/2, k-1/2} - \alpha_1(q_{n, i-1/2, j-1/2, k-1/2} - q_{nm, i, j-1/2, k-1/2}),$$

$$V_{i, j-1/2, k-1/2} = V_{i-1/2, j-1/2, k-1/2} - \beta_1(q_{n, i-1/2, j-1/2, k-1/2} - q_{nm, i, j-1/2, k-1/2}),$$

$$W_{i, j-1/2, k-1/2} = W_{i-1/2, j-1/2, k-1/2} - \gamma_1(q_{n, i-1/2, j-1/2, k-1/2} - q_{nm, i, j-1/2, k-1/2});$$

$$b) \quad q_{mn, i, j-1/2, k-1/2} < 0, \text{ в этом случае}$$

$$P_{i, j-1/2, k-1/2} = P_{i+1/2, j-1/2, k-1/2} \times \frac{((k^+ + 1)P)_{i, j-1/2, k-1/2} + ((k - 1)P)_{i+1/2, j-1/2, k-1/2}}{((k^+ - 1)P)_{i, j-1/2, k-1/2} + ((k + 1)P)_{i+1/2, j-1/2, k-1/2}},$$

$$k_{i, j-1/2, k-1/2}^+ = k_{i+1/2, j-1/2, k-1/2};$$

$$Q_{i, j-1/2, k-1/2} = Q_{i+1/2, j-1/2, k-1/2};$$

$$\bar{q}_{n, i, j-1/2, k-1/2} = q_{mn, i, j-1/2, k-1/2} \bar{n};$$

$$\bar{q}_{t, i, j-1/2, k-1/2} = \bar{q}_{t, i+1/2, j-1/2, k-1/2};$$

проекции скоростей на координатные оси с учетом (4.17) будут такими:

$$U_{i, j-1/2, k-1/2} = U_{i+1/2, j-1/2, k-1/2} - \alpha_1(q_{n, i+1/2, j-1/2, k-1/2} - q_{nm, i, j-1/2, k-1/2});$$

$$V_{i,j-1/2,k-1/2} = V_{i+1/2,j-1/2,k-1/2} - \beta_1(q_{n_{i+1/2,j-1/2,k-1/2}} - q_{nm_{i,j-1/2,k-1/2}});$$

$$W_{i,j-1/2,k-1/2} = W_{i+1/2,j-1/2,k-1/2} - \gamma_1(q_{n_{i+1/2,j-1/2,k-1/2}} - q_{nm_{i,j-1/2,k-1/2}}).$$

Расчетные формулы распада разрыва на гранях $(i - 1/2, j, k - 1/2)$ и $(i - 1/2, j - 1/2, k)$ и т.п. не приводим, так как они с точностью до индексов совпадают с аналогичными формулами распада разрыва на грани $(i, j - 1/2, k - 1/2)$.

Шаг интегрирования по времени τ определяли из условия устойчивости разностной схемы для линеаризованной системы уравнений

$$\tau \leq \frac{\tau_x \tau_y \tau_z}{\tau_x \tau_y + \tau_y \tau_z + \tau_x \tau_z}, \quad (4.29)$$

где τ_x, τ_y, τ_z – временные интервалы, за которые волны, образовавшиеся в задаче о распаде разрыва, достигают противоположных граней ячейки по осям X, Y и Z. В соответствии с формулой (4.29) для каждой ячейки использовали минимальное по ячейкам расчетной области значение временного шага.

Таким образом, предложен алгоритм численного моделирования смешения газов, который описывает экологические процессы в атмосфере: выброс, смешение и распространение газовой примеси в атмосфере; истечение газовой примеси в атмосферу; взрыв газообразной примеси в атмосфере с учетом химического взаимодействия (в том числе в многосвязных областях со сложным рельефом местности).

4.5. Разработка объектно-ориентированной информационной технологии и компьютерной системы инженерного анализа газодинамических процессов смешения газов в атмосфере

Компьютерное моделирование рассматриваемых процессов осуществлялось с использованием программного комплекса FIRE[®] [114], разработанного Ю.А. Скобом, реализующего предложенную математическую модель.

FIRE[®] требует задания следующих входных данных: геометрии моделируемого объема; плана помещения, включающего размеры входных и оконных проемов; атмосферных условий; типа, параметров и местоположения источника возгораемой компоненты (топлива); местоположения источника зажигания, теплофизических свойств компонентов, размеров вычислительной сетки.

Программный комплекс FIRE[®] позволяет вычислять плотность, скорость, давление, температуру смеси, концентрации компонентов смеси (топлива, воздуха, продуктов сгорания), скорость тепловыделения в пре-

делах каждого контрольного объема смеси на каждом дискретном временном шаге.

Обобщенные величины, зарегистрированные в соответствии с программным комплексом FIRE[®], включают в себя:

- суммарную скорость тепловыделения;
- среднеобъемное избыточное давление;
- среднеобъемную избыточную температуру.

В практической деятельности довольно часто возникают задачи, в которых необходимо при описании физических процессов смешения реагирующих газов с воздухом, их горения (с учетом химического взаимодействия компонент смесей) учитывать наличие в расчетной области капель (частиц пыли твердых фракций).

Программный комплекс FIRE[®] представляет собой компьютерную интерактивную систему инженерного трехмерного анализа газодинамических процессов смешения двух газов. Разработанная интегрированная интерактивная среда пользователя, объединяющая в себе все выполняемые модули САЕ-системы, реализует следующие функции:

- генерацию исходных данных;
- редактирование файлов данных;
- просмотр файлов данных;
- запуск выполняемых модулей;
- визуализацию файлов данных.

САЕ-система предназначена для прогнозирования путем численного моделирования газодинамических процессов распространения продуктов горения в замкнутых объемах с системами естественной и принудительной вентиляции. Для реализации этой цели при разработке программных приложений был использован язык программирования С++, так как он идеально подходит для Windows-программирования на основе объектно-ориентированного подхода. Он позволяет хранить большую часть программного кода внутри самостоятельных объектов, что сокращает объем программы и облегчает отладку и сопровождение.

Приложение написано в интегрированной среде разработки Visual C++ 3.0 Enterprise Edition с применением библиотеки Microsoft Foundation Classes (MFC) [144, 163]. Использован мастер Application Wizard приложения для построения каркаса приложения с однодокументным интерфейсом на базе SDI-шаблона (Single Document Interface) в соответствии с архитектурой Документ–Вид (Document–View). Центральным объектом в данной архитектуре является объект, называемый документом. Он ориентирован на хранение информации и имеет хорошо развитые методы загрузки, сохранения и управления данными. Документ сопровождается объектом-обликом, предназначенным для отображения документа на экране и распознавания команд пользователя по управлению документом.

Структурный анализ алгоритма расчета в целом позволяет выделить ряд основных блоков (модулей), установить между ними связь в смысле направлений обмена входными–выходными данными.

В соответствии с основными принципами системного подхода методом декомпозиции и на основе разработанного алгоритма расчета построена структурная схема САЕ-системы. Одним из основных принципов системного подхода является пошаговая детализация методом нисходящего проектирования. Пошаговая детализация состоит в разделении функции некоторой программы на более простые функции, затем каждую такую функцию детализируют, полученную часть опять разбивают на более простые модули. Модуль – автономная синтаксически законченная программная единица, предназначенная для выполнения функций, определенных в его спецификации.

Достоинством предложенной декомпозиции является наличие только прямых связей, что позволяет легко автоматизировать управление потоками данных и порядком решаемых задач.

Компьютерная система инженерного анализа газодинамических процессов смешения газов включает в себя несколько выполняемых модулей. В укрупненном виде САЕ-систему разбивают на две части:

- системное наполнение (СН), содержащее системные средства, необходимые для эксплуатации САЕ-системы; СН включает в себя подпрограммы формирования структурированных задач для проведения необходимых расчетов, подпрограммы ввода/вывода данных, визуализации;

- функциональное наполнение (ФН) – комплекс подпрограмм для построения численного решения задач; в свою очередь, функциональное наполнение САЕ-системы делится на две части:

- базисная часть комплекса (БЧК) – совокупность базисных программных модулей (БМ), необходимых для непосредственного решения базисных задач;

- функциональная часть комплекса (ФЧК) – функциональные программные модули (ФМ), предназначенные для расчета коэффициентов, параметров и других данных, используемых для работы БМ.

Базисными задачами для данной САЕ-системы являются:

- а) задача расчета геометрических параметров расчетной области (Geometry);

- б) задача расчета параметров нестационарного трехмерного течения двухкомпонентной смеси газов (Flow);

- в) задача расчета относительной массовой плотности компоненты смеси (Components).

САЕ-система предназначена для работы на персональных компьютерах под управлением операционных систем Microsoft Windows, Windows NT и более поздних. Для функционирования системы требуется следующая минимальная конфигурация ЭВМ:

- а) процессор Intel Pentium с тактовой частотой 100 МГц;

б) 16 Мбайт оперативной памяти;

в) накопитель на жестком магнитном диске (НЖМД) со свободным пространством не менее 15 Мбайт;

г) видеоадаптер SVGA 1 Мбайт.

Для нормального функционирования и максимально полного использования возможностей системы рекомендуется такая конфигурация ЭВМ:

а) процессор с тактовой частотой 633 МГц;

б) 64 Мбайт оперативной памяти;

в) накопитель на жестком магнитном диске со свободным пространством не менее 1 Гб;

г) видеоадаптер SVGA 2 Мбайт;

Работа с САЕ-системой начинается с запуска файла «?».

Запуск приложения на выполнение приводит к появлению окна, снабженного всеми атрибутами:

- заголовочной полосой с именем приложения и кнопками системного меню (минимизации, максимизации и выключения);

- строкой меню пользователя с командами;

- полосой инструментальных кнопок, дублирующих основные команды меню;

- клиентской частью окна для отображения *вида*;

- статус-строкой, где выводятся краткие подсказки, режимы работы клавиатуры, текущие дата и время.

При запуске появляется заставка с данными разработчика, сопровождаемая звуковым сигналом (при наличии звуковой платы). Заставку автоматически убирают через некоторое время (либо нажатием клавиши «мыши»).

В меню «Файл» сосредоточены следующие команды:

- Open – для открытия имеющегося *документа*, хранящегося в виде файла на диске;

- Save – для сохранения данных текущего документа на диске;

- Save as... – для сохранения данных текущего документа на диске под другим именем;

- Exit – для завершения работы приложения, здесь также выводятся имена нескольких последних документов для облегчения загрузки.

В меню «Редактор» содержится команда редактирования данных нового документа (ей соответствует инструментальная кнопка E).

Меню «Вид» позволяет убирать и показывать панель инструментальных кнопок (Toolbar) и статус-строку (Status Bar).

В меню «Справка» содержится команда, выводящая диалоговую панель с данными о версии приложения (кнопка «?»).

Меню «Расчет» включает в себя следующие основные команды расчета параметров среды в расчетной области:

- Initial – инициализация параметров среды в расчетной области (кнопка «I»);

- Geometry – расчет геометрических характеристик расчетной области (кнопка «G»);

- Flow – расчет параметров среды методом установления по времени (кнопка «F»);

- Visual – визуализация статической температуры в поперечных сечениях расчетной области (кнопка «V»).

Команды меню продублированы так называемыми ускорителями (краткими командами) – комбинациями клавиш (например, команде меню Файл/New соответствует Ctrl-N).

Расчет может проводиться в двух вариантах после запуска программы: создание нового документа или продолжение работы со старым документом, сохраненным на диске.

Схема 1-го варианта.

1. Редактирование исходных данных (Редактор/Edit Document) с помощью листа свойств Property Sheet, на каждом из которых сгруппированы необходимые для расчета данные: закладка «Область» требует ввести или подтвердить размеры расчетной области и количество расчетных ячеек по осям; «Воздух» – газодинамические параметры среды; «Примесь» – газодинамические параметры примеси; «Установление» – параметры процесса установления по времени; «Облако» – относительные размеры и расположение облака примеси; «Границы» – относительные размеры и расположение сплошных тел и проницаемость поверхностей прямоугольной расчетной области.

2. Инициализация параметров среды (Расчет/Initial).

3. Расчет геометрических параметров сетки (Расчет/Geometry).

4. Расчет газодинамических параметров среды методом установления (Расчет/Flow). Появляется диалоговая панель “Поток”, служащая для контроля расчета. В верхней части выводятся исходные данные, а в нижней – текущие контрольные параметры (физическое время, прогресс расчета, количество временных шагов, невязка плотности). Расчет начинается нажатием кнопки «Старт», заканчивается – «Финиш». Так как диалоговая панель является немодальной (позволяет во время своего функционирования работать с другими частями приложения: визуализировать текущие результаты расчета, сохранять текущее состояние документа и др., что не позволяет делать модальная диалоговая панель редактирования исходных данных), закрывать ее необходимо только с помощью кнопки «Финиш». Панель “Поток” можно минимизировать и максимизировать соответствующими кнопками в заголовочной полосе.

5. Визуализация полей газодинамических параметров в трех вариантах сечений (Расчет/Visual). На возникающей модальной диалоговой панели следует отметить вариант визуализации (вывод в цвете, в градациях серого цвета, клишированием, изолинии), ввести номер ячейки в соответствующем направлении, где проводится сечение (можно указать расстояние в продольном направлении и нажать кнопку «Применить», чтобы получить нужный номер ячейки), выбрать необходимый параметр визуализации, плоскость, параллельно которой будет проводиться сечение, под-

твердить или отредактировать предельные значения функции для визуализации и нажать кнопку «Показать».

6. Сохранить текущее состояние Документа (Файл/Save или Файл/Save as...) под произвольным именем, допустимым Windows.

Схема 2-го варианта.

1. Открыть Документ (Файл/Оpen), выбрав в появляющейся диалоговой панели ранее сохраненный файл.

2. Продолжить расчет методом установления (см. п. 4, 5, 6 первого варианта).

Рассмотрим приложения данной САЕ-системы для решения задач, связанных с разработкой систем управления экологической безопасностью.

4.6. Моделирование системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной степными или лесными пожарами

4.6.1. Моделирование воздействия взрыва объемного шлангового заряда на лесной фитоценоз и растительный покров

Возможность применения минерализованных полос для локализации пожаров рассматривалась выше. Создание с помощью взрыва минерализованной полосы – относительно простое и эффективное средство, если использовать топливовоздушные заряды. Увеличение диаметра оболочки шлангового заряда приводит к возрастанию ширины минерализованной полосы. Но при этом увеличиваются материальные затраты, связанные с ростом расхода топлива и массы материала оболочки на создание заряда. Также происходит уменьшение производительности инженерной техники в связи с ограниченной скоростью наполнения оболочки шлангового заряда. Таким образом, возникает задача оптимизации размеров заряда, которая может быть решена путем математического моделирования.

Трехмерное математическое моделирование воздействия взрыва объемного шлангового заряда на лесной фитоценоз и растительный покров проводилось с использованием нестационарных уравнений газовой динамики для сжимаемого газа в декартовой системе координат [70, 162, 203, 337].

Для учета влияния лесного фитоценоза и растительного покрова на распространение ударной волны применялся подход А.М. Гришина [70], согласно которому сила сопротивления лесного фитоценоза и растительного покрова определялась по формуле

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -C_d \frac{\rho q^2}{2} \sigma_k \frac{\vec{q}}{|\vec{q}|} = -k\rho q^2 \frac{\vec{q}}{|\vec{q}|},$$

где k – эффективный коэффициент аэродинамического сопротивления среды.

Компьютерное моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса FIRE® [114]. Программный комплекс FIRE® позволяет вычислять плотность, скорость, давление, температуру смеси, концентрации компонентов смеси (топлива, воздуха, продуктов сгорания), скорость тепловыделения в пределах каждого контрольного объема смеси на каждом дискретном временном шаге.

При моделировании взрыва объемного шлангового заряда в полосе леса ось заряда в расчетной области располагалась на середине высоты леса $H_{зар} = \frac{1}{2} \cdot H_{леса}$ при $H_{леса} = 3$ м (рис. 4.2).

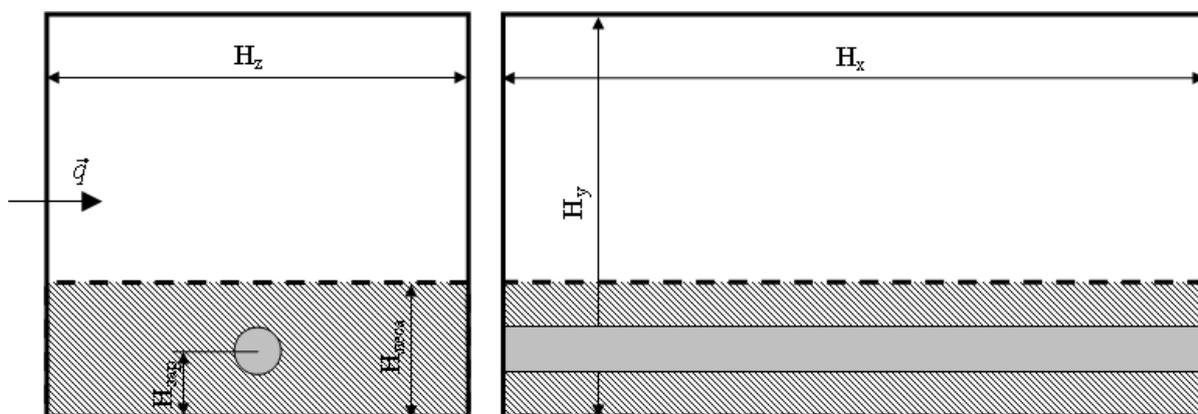


Рис. 4.2. Схема задания начальных условий взрыва объемного шлангового заряда в полосе леса

Диаметр заряда $d = 0,9$ м. Размеры расчетной области составляли $H_x = 5$ м, $H_y = 9$ м, $H_z = 19$ м, которые разбивались на 25, 45 и 95 секущих плоскостей соответственно. Полагалось, что фитоценоз образован сосновым молодняком (представлен заштрихованной областью на рис. 4.2), где эффективный коэффициент аэродинамического сопротивления среды $k = 0,7$. При расчете распространения ударной волны в воздухе данный коэффициент приравнивался нулю. Динамика расширения продуктов детонации рассматривалась применительно к физическому взрыву. Принято, что в начальный момент времени в оболочке заряда расположены продукты детонации смеси пропана с воздухом с параметрами $P_d \approx 11 \cdot 10^5$ Па, $T_d = 2842$ К, $\gamma_d = 1,278$, $\rho_d = 1,32$ кг/м³ и средней молярной массой $M_n = 28,36 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. В начальный момент времени во всех «газообразных» ячейках расчетной области приняты параметры окружающей среды, которые соответствовали воздуху с параметрами: $T_c = 293$ К, $P_c = 101325$ Па, $\gamma_c = 1,3$. Скорость набегающего потока ветра $\vec{q} = 3$ м/с. Земная поверхность в расчетах представлялась в виде непроницаемых участков, ограничивающих расчетную область поверхностями.

В результате расчетов получено, что дальность взрывной волны объемного шлангового заряда диаметром 0,9 м при заданных внешних условиях достигает около 2,5 и 5 м для критических перепадов давления, равных $1,2 \cdot 10^5$ Па и $0,4 \cdot 10^5$ Па соответственно (рис. 4.3).

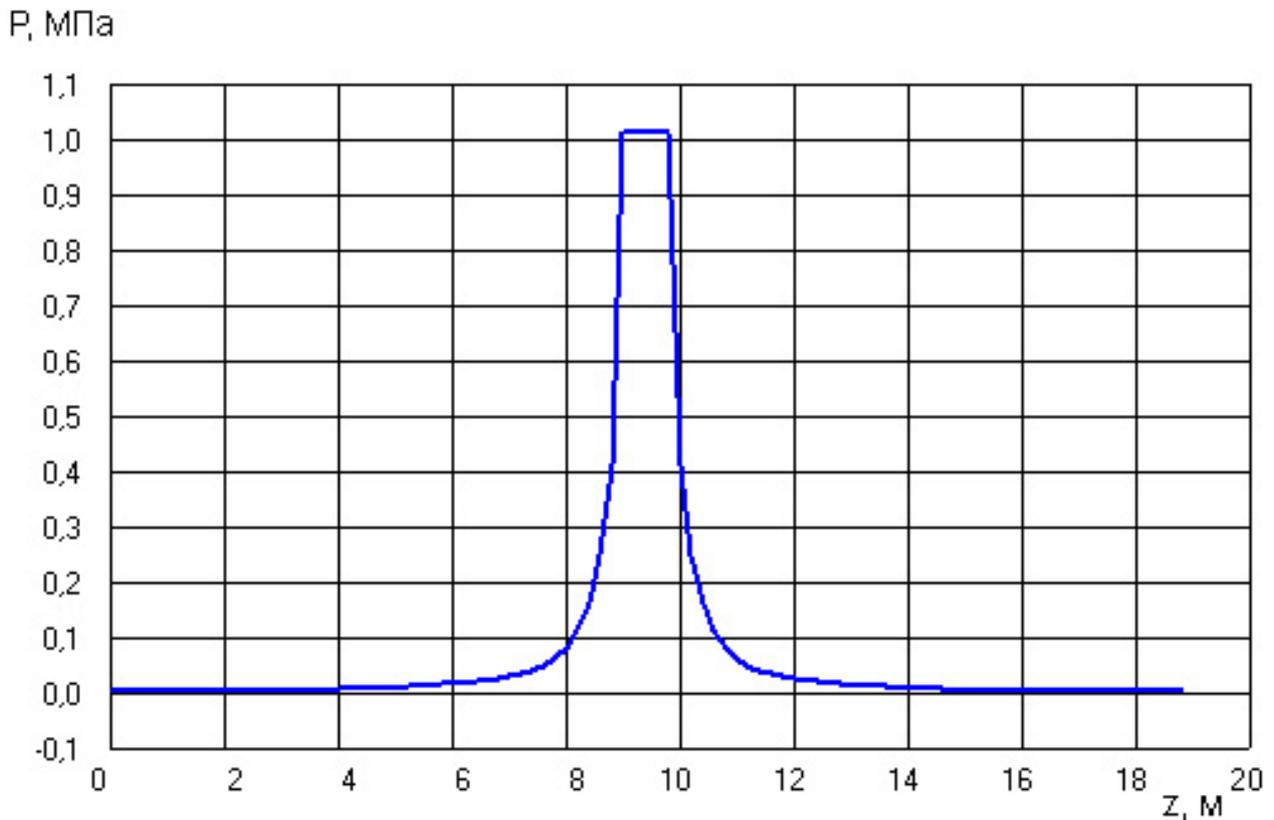


Рис. 4.3. Кривая максимумов избыточного давления в поперечном сечении заряда, возникающего при взрыве шлангового заряда диаметром 0,9 м

Под критическим перепадом давления понимается давление, в случае превышения которого обеспечивается сдувание тонких хвоинок и веточек. Следует учесть, что во фронте ударной волны скачок давления в два раза превышает расчетные. Полученный результат показывает, что при данном диаметре заряда обеспечивается создание минерализованной полосы шириной от 5 до 10 м в молодом сосновом лесу высотой 3 м.

Математическое моделирование ударного воздействия на растительный покров проведено в соответствии со схемой (рис. 4.4), в которой применялось два параллельно расположенных шланговых заряда (поз. 1). Полагалось, что средняя высота растительного покрова (поз. 2) составляет $h = 0,15$ м. В расчетных ячейках, моделирующих сопротивление данного слоя, эффективный коэффициент аэродинамического сопротивления среды $k = 0,9$. В проведенной серии расчетов изменялись расстояние между оболочками и их диаметр.

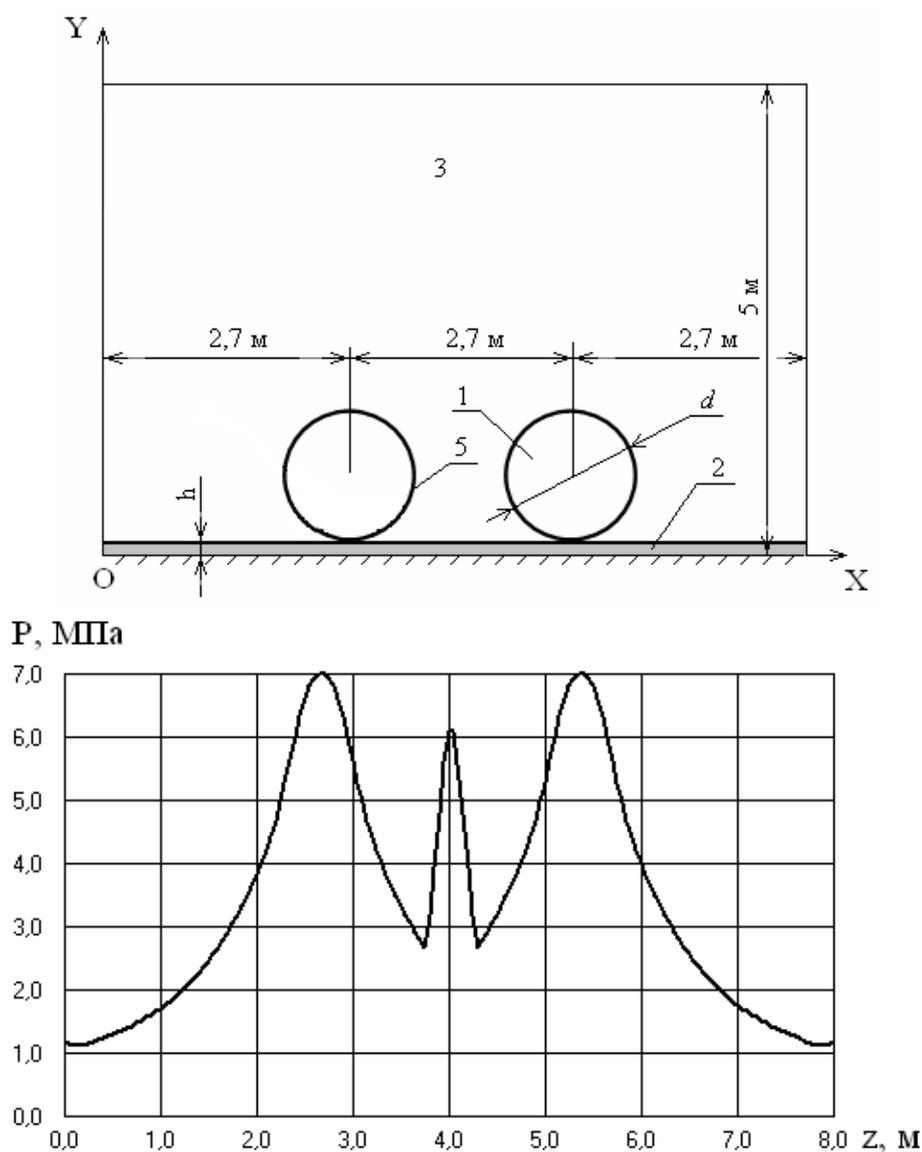


Рис. 4.4. Схема задания начальных условий взрыва объемных шланговых зарядов на растительном покрове

В результате численного моделирования получено, что на растительный покров заданных параметров воздействует ударная волна с перепадом давления за ее фронтом более $1,2 \cdot 10^5$ Па на ширине около 8 м.

Увеличение дальнобойности ударной волны в данном случае обеспечивается процессом отражения волн от земной поверхности и встречным взаимодействием ударных волн от взрыва двух зарядов (рис. 4.5).

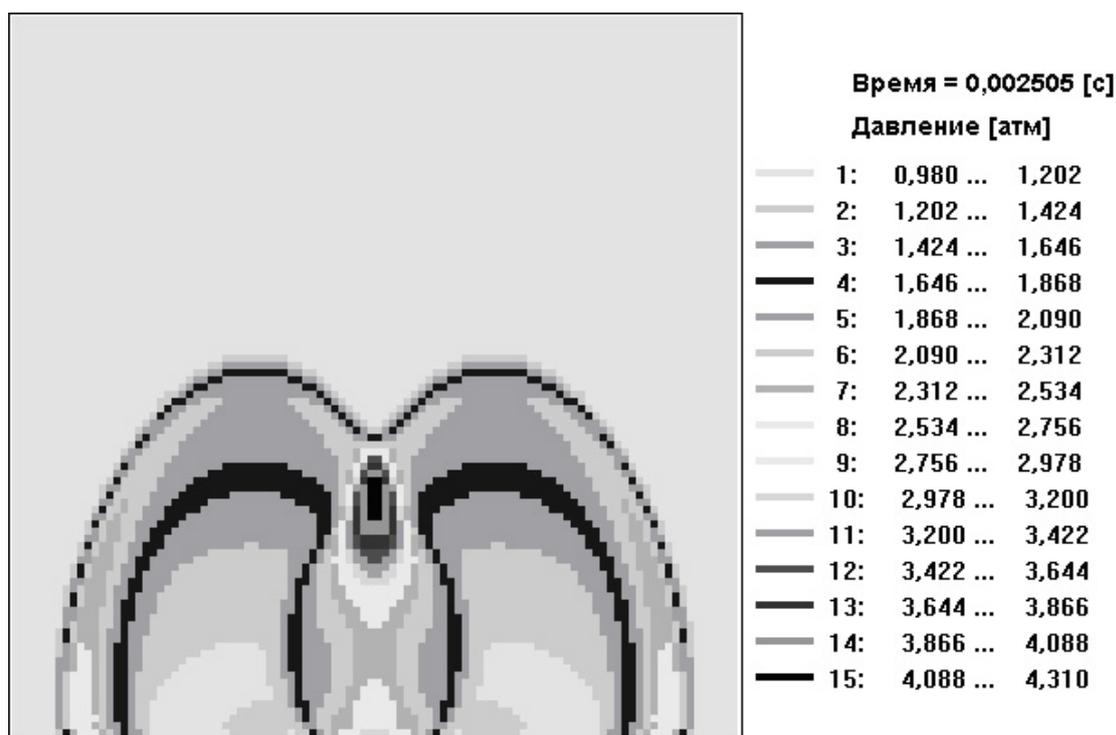


Рис. 4.5. Поле давления в поперечном сечении двух шланговых зарядов на момент времени 0,002505 с от начала взрыва

Так как при взрыве двух зарядов необходимо добиться не только срыва растительного покрова, но и его выброса за область формируемой минерализованной полосы, то расстояние между зарядами должно быть таким, чтобы в результате взаимодействия разлетающихся продуктов взрыва произошло перестроение динамики разлета в полусферический взрыв одного заряда. Например, при диаметре двух зарядов $d = 0,9$ м данное условие достигается, если расстояние между их осями не превышает 2,7 м.

Следует учитывать, что применяемая математическая модель позволяет рассчитать ударное действие взрыва шлангового заряда исходя из энергии взрыва заряда. Это позволяет оптимизировать размер зарядов в диаметре и расстояние между зарядами. Но может иметь место случай, когда при рассчитанном диаметре объемного шлангового заряда не может распространяться самоподдерживающаяся детонация. В этом случае диаметр заряда задается исходя из размеров критического диаметра (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Критический диаметр заряда различных топлив в стехиометрической смеси с воздухом

Топливо	Размер детонационной ячейки λ , мм	Критический диаметр $D_{кр}$, м
H ₂	15,9±2	0,32
CH ₄	500±80	10
C ₂ H ₂	13,6±1,6	0,27
C ₂ H ₄	39±6	0,78
C ₂ H ₆	88±14	1,76
C ₃ H ₈	72±12	1,44
C ₄ H ₁₀	85	1,7

4.6.2. Моделирование формирования области обрыва лесогорючих материалов (ЛГМ) при взрыве топливовоздушных зарядов в лесном фитоценозе

Тушение пожара на больших площадях в условиях изменения направления ветра требует перераспределения сил и средств, что достижимо только при наличии мобильных средств доставки и тушения. Для применения пособия локализации пожаров взрывом необходима оценка эффективности, определяемой параметрами заряда. Эта оценка проведена путем математического моделирования области обрыва лесогорючих материалов (ЛГМ), формируемой при взрыве топливовоздушных зарядов в лесном фитоценозе. Переход пожара из низовой стадии в верховую требует иной техники применения способа локализации взрывом и, соответственно, дополнительных исследований. Задачу оптимизации размеров зарядов топливовоздушных смесей, количества, места их расположения следует рассматривать в зависимости от размеров и плотности лесного фитоценоза в лесном массиве.

Устойчивый верховой пожар появляется вследствие зарождения низового пожара, после того, как пламя низового пожара поджигает кроны деревьев [34]. В верховом пожаре сгорают хвоя, листья, мелкие и более крупные ветви. Переходу низового пожара на полог древостоя способствуют сильный ветер, насаждения с низко опущенными кронами и обильный хвойный подрост. Установлено, что при распространении низового пожара вверх по склону он очень часто переходит в верховой [34]. При верховом устойчивом пожаре огонь распространяется по кронам только по мере продвижения кромки низового пожара. В условиях сильного ветра возникает верховой беглый пожар, который распространяется по кронам деревьев «скачками», опережая фронт низового пожара. Ветер также разносит горящие ветви, другие мелкие горящие объекты и искры, которые создают новые очаги низовых пожаров на сотни метров вперед от основного очага. В ряде случаев огонь «перебрасывается» указанным способом через реки, широкие дороги, безлесные участки и другие возможные ру-

бежи, созданные для локализации пожара.

Исходя из характера распространения верхового пожара, техника тушения с использованием топливовоздушного взрыва должна заключаться в создании в лесном фитоценозе в кронах деревьев области без хвои, листьев и мелких веток. Эту область в виде полос необходимо чередовать на определенном смещении с минерализованными полосами (рис. 4.6), то есть один или несколько шланговых зарядов располагать на земной поверхности на подстилке леса с целью создания минерализованной полосы для отсечения низового пожара, а локализацию верхового пожара обеспечивать взрывом одного или нескольких зарядов, расположенных поверх крон деревьев. Проведено исследование воздействия взрыва топливовоздушного шлангового заряда в случае его расположения поверх крон деревьев.

Трехмерное математическое моделирование формирования области обрыва ЛГМ при взрыве топливовоздушных зарядов в лесном фитоценозе проводилось с использованием нестационарных уравнений газовой динамики для сжимаемого газа в декартовой системе координат [15, 112, 114]. Компьютерное моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса FIRE[®] [114].

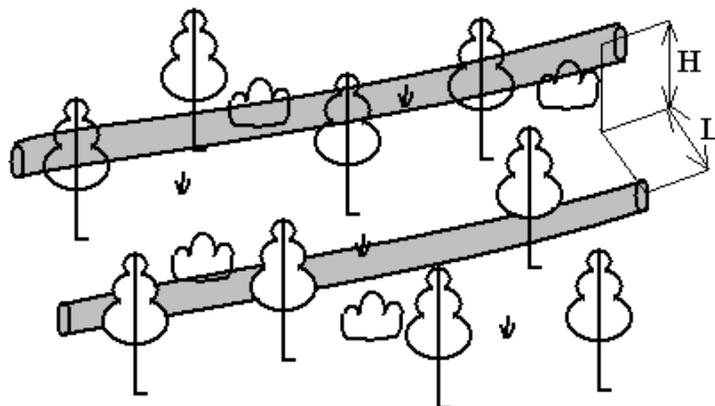


Рис. 4.6. Схема тушения лесного пожара, имеющего верховую и низовую стадии: L – относительное смещение зарядов вдоль земной поверхности; H – высота расположения заряда, обеспечивающего локализацию верхового пожара

Проведем оценку размеров области обрыва ЛГМ, получаемой при взрыве топливовоздушных шланговых зарядов разных диаметров при их расположении поверх крон деревьев. В таком случае расчет сводится к установлению области, в которой избыточное давление в ударной волне за период распространения в лесном фитоценозе превышает критический перепад давления. Под критическим перепадом давления в данном случае понимается экспериментально установленный перепад давления, при котором достигается степень обрыва лесогорючих материалов более чем

на 75 %. По данным работы [70] эта величина в сосновых молодняках составляет $\Delta P = 0,4 \cdot 10^5$ Па.

В случае произвольного расположения заряда поверх деревьев часть участков шлангового заряда будет над кронами деревьев, а другие его участки попадут между кронами. Усредняя месторасположение заряда в лесном фитоценозе, примем определенную расчетную схему (рис. 4.7).

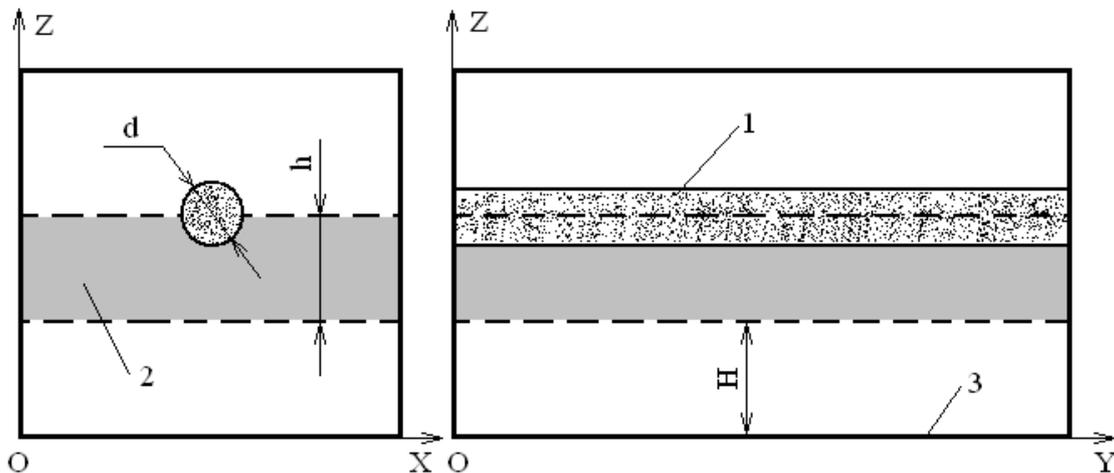


Рис. 4.7. Схема расположения заряда принятая в расчетах:
 1 – топливоздушный шланговый заряд; 2 – область крон деревьев;
 3 – земная поверхность

На приведенном рисунке представлена схема расположения заряда в фитоценозе при его поперечном и продольном сечениях. Заряд диаметром d располагается наполовину углубленным в кроны деревьев по отношению к средней их высоте. Среднее расстояние между верхними и нижними кронами составляет h . Среднее расстояние между нижними кронами и земной поверхностью равняется H . В результате оценки дальнобойности взрывного действия при таком расположении заряда требуется установить область превышения критического давления вдоль линии нижней кромки деревьев. Очевидно, что ширина полосы обрыва ЛГМ по всей высоте кромки деревьев определяется не только диаметром заряда, но и средним расстоянием между верхними и нижними кронами h , а высота H влияет на плотность распределения оборванных ЛГМ на земной поверхности.

В работе [203] установлено, что при цилиндрическом взрыве конденсированных взрывчатых веществ закон падения давления до перепада давления во фронте волны $\Delta P \approx 10^6$ Па имеет вид $\Delta P \sim r^{-\frac{3}{2}}$, где r – радиус от центра взрыва до ударной волны.

Данная формула не может быть применена для расчета области обрыва ЛГМ, так как в результате детонации топливоздушных смесей среднее давление продуктов детонации достигает порядка 10^6 Па.

В работе [162] на основании обобщения результатов теоретических и экспериментальных данных по взрывам топливовоздушных смесей сферической формы получено, что для параметров воздушных ударных волн, образующихся при детонации в воздухе, существует общий закон подобия. Применяя данный закон, зависимость безразмерного избыточного давления от расстояния в безразмерных координатах для различных составов газовой смеси и при разной массе детонирующего газа имеет вид [162]

$$\bar{p} = 0,285 \frac{\exp[0,52(\ln(\bar{R}))^2]}{\bar{R}},$$

где $\bar{p} = \Delta P/p_0$ – безразмерное избыточное давление; p_0 – начальное давление в атмосфере; $\bar{R} = R/R_0$ – безразмерное расстояние; R – расстояние от центра взрыва; $R_0 = (E_0/p_0)^{1/3}$; $E_0 = mQ$ – энергия взрывного превращения; Q – удельная теплота взрыва топливовоздушной смеси; m – масса газового облака. Авторы указывают, что несферическая форма облака, отличия в составе смеси приводят к отклонению реального перепада давления от расчетного на 10 – 15 %.

Так как это выражение применимо к расчету перепада давления для ударной волны, распространяющейся в воздухе, то правильность результатов оценки перепада давления по данному выражению для расчета распространения ударной волны в лесном фитоценозе вызывает сомнения. Учитывая, что лесной фитоценоз представляет собой среду более повышенного сопротивления течению газового потока, это выражение позволяет дать ориентировочную оценку максимального радиуса области обрыва ЛГМ.

Для получения более точной оценки размеров области обрыва ЛГМ данная задача рассмотрена с точки зрения механики сплошных сред согласно методике, предложенной в работе [142].

Параметры продуктов детонации в оболочке в начальный момент времени задавались по модели мгновенного взрыва и для пропановоздушной смеси были приняты такими: $P_{\text{взр}} = 9,5 \cdot 10^5$ Па, $T_{\text{взр}} = 2840$ К. Диаметр заряда в расчетах $d = 1,3$ м, высота $h = 3$ м, $H = 4$ м. Ветер задавался в поперечном направлении к заряду и имел скорость 5 м/с. Эффективный коэффициент аэродинамического сопротивления среды принят равным $k = 0,7$.

Результаты расчетов распределения концентрации продуктов детонации на момент времени 0,3 с от момента взрыва представлены рис. 4.8. Как видно, боковой ветер вызывает асимметрию в распределении концентрации продуктов реакции. Но его влияние на формирование поля давления пренебрежимо мало.

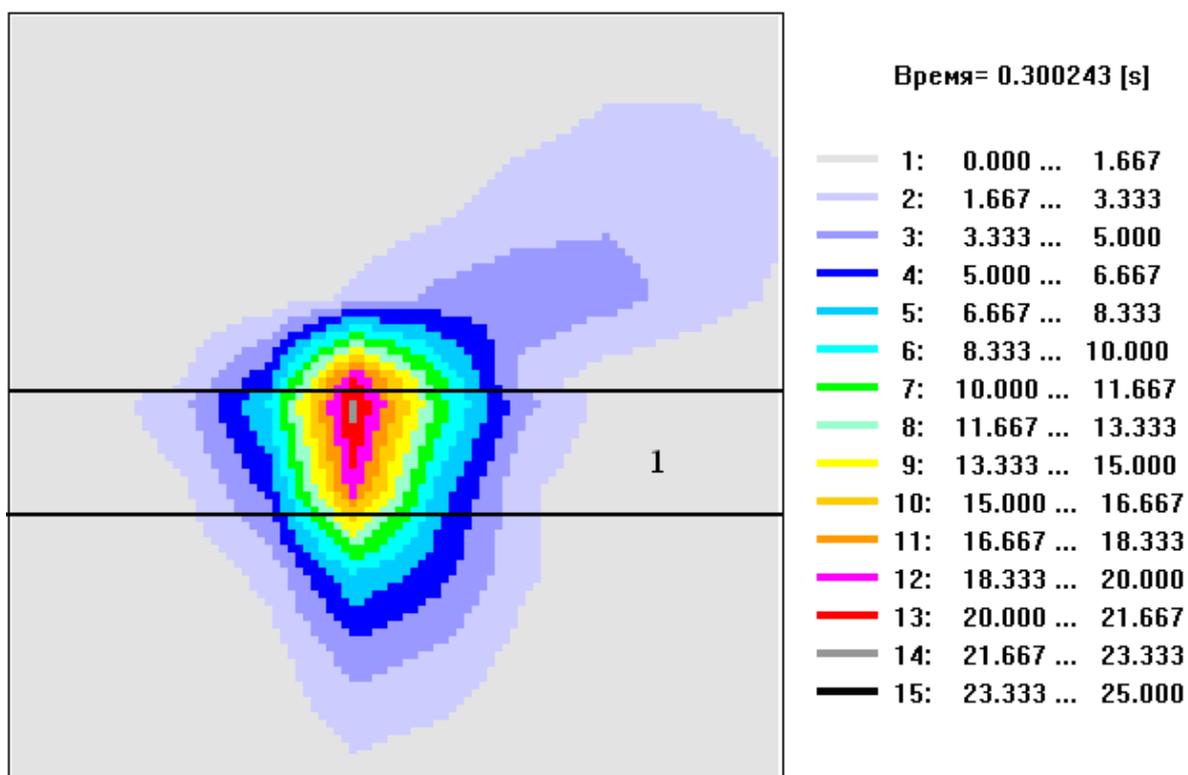


Рис. 4.8. Результаты расчета концентрации:
1 – область крон деревьев

Распределение максимального перепада давления вдоль нижней полосы, моделирующей нижнюю кромку деревьев, имеет вид, представленный на рис. 4.9.

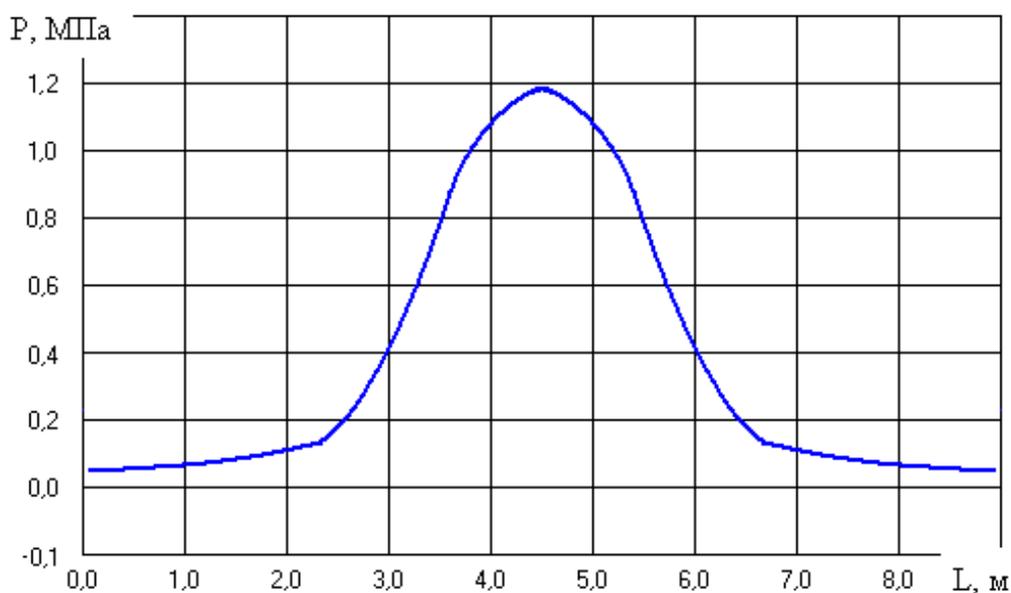


Рис. 4.9. Распределение максимумов избыточного давления вдоль нижней кромки крон деревьев

Пользуясь величиной критического давления и результатами расчетов, получим, что ширина полосы обрыва ЛГМ составляет в данном случае около 3 м. Расчет избыточного давления показывает перепад давления выше критического на 5,5 м от центра взрыва, что более чем на 1,2 м превышает значения результатов моделирования. Таким образом, аналитическая зависимость приводит к существенным искажениям в оценке области обрыва ЛГМ из-за неучета возрастания сопротивления среды.

Как показывает проведенное численное моделирование, а также практическое применение рассматриваемого способа обеспечения экологической безопасности, создаваемое избыточное давление часто необходимо локализовать. Для локализации давления в определенных направлениях рекомендуется использовать многофазные дисперсные структуры. Работа многофазных дисперсных структур по локализации давления и снижению температуры будет рассмотрена в следующем подразделе.

4.7. Моделирование системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной взрывом метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт

Опасность, вызванная взрывом метано-воздушной смеси и угольной пыли в шахте, приводит к авариям техногенно-экологического характера из-за специфики подземного производства. Наличие избыточного давления, формирование и распространение ударной волны по сети горных выработок являютсяотягчающими факторами. Краткий анализ методов предотвращения таких чрезвычайных ситуаций выполнен в разд. 1. Один из наиболее эффективных методов предотвращения чрезвычайной ситуации – создание водяных завес для снижения концентрации угольной пыли.

В отличие от обычных распылителей атомайзеры способны создавать мелкодисперсную водовоздушную смесь с витающими каплями, характерный размер которых составляет порядка 20...40 мкм [54, 62, 80, 150]. Натурные испытания с отдельными экспериментальными образцами атомайзеров показали не только способность создавать частицы заданного размера, но и существенно снижать расход жидкости при создании водовоздушной завесы. Создание и удержание водовоздушного облака гораздо эффективнее, чем при обычных распылителях.

Рудничная пыль представляет собой твердое вещество полезного ископаемого или породы в состоянии тонкого раздробления (измельчения). Находясь во взвешенном состоянии в воздухе, пыль образует дисперсную систему (аэрозоль). Частички пыли составляют дисперсную фазу, воздух является дисперсионной средой.

Трехмерное математическое моделирование воздействия водяных завес как средства снижения последствий взрывов метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт проводилось с использованием нестационарных уравнений газовой динамики для сжимаемого газа в декартовой системе координат [22, 23, 135]. Компьютерное моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса FIRE® [114].

Проведено компьютерное моделирование процесса взрыва облака метано-воздушной смеси и угольной пыли в штреке угольной шахты. Расчетная область представлена на рис. 4.10. Вычислительный эксперимент осуществлялся при следующих условиях: длина штрека $L_z = 31,2$ м, высота штрека $L_y = 2,2$ м, скорость ветра на входе $q = 6$ м/с, облако метано-воздушной смеси располагалось на расстоянии $Z_1 = 10,1$ м от входа, радиус облака $R_1 = 1,6$ м (рис. 4.10, а).

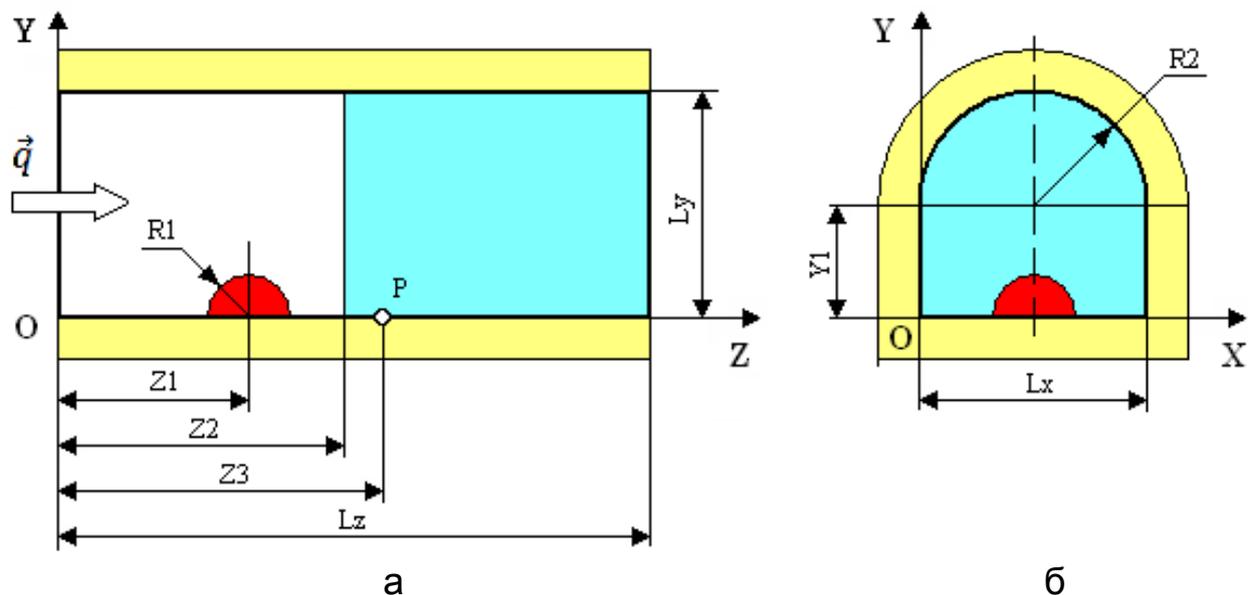


Рис. 4.10. Схема расчетной области

На расстоянии $Z_2 = 13$ м располагалась зона, заполненная мелкодисперсной фазой – частицами угольной пыли либо каплями воды (в зависимости от рассматриваемого сценария расчета). Предполагалось, что в случае наличия в этой зоне капель воды обеспечивается полное осаждение угольной пыли. На расстоянии $Z_3 = 14,9$ м располагалась контрольная точка P, в которой осуществлялись изменения избыточного давления, температуры газовой смеси. Форма поперечного сечения штрека представлена на рис. 4.10 б, здесь $L_x = 3,2$ м, $Y_1 = 0,6$ м, $R_2 = 1,6$ м.

Рассматривались три возможных сценария развития событий, связанных с процессом взрыва облака метано-воздушной смеси в штреке. В

начальный момент времени в результате взрыва метано-воздушной смеси формировалось облако продуктов сгорания с высоким давлением и температурой. Далее реализовался процесс рассеяния продуктов сгорания, сопровождающийся конвективным переносом и турбулентным рассеянием продуктов сгорания вдоль штрека. Согласно принятым расчетным схемам в первом случае (сценарий 1) рассматривалось рассеяние продуктов сгорания вдоль штрека при наличии угольной пыли в воздухе, во втором случае (сценарий 2) – без наличия дисперсных фаз, в третьем случае (сценарий 3) – при наличии капель воды (водяной завесы) в воздухе.

Как следует из анализа результатов расчетов, присутствие в воздухе угольной пыли приводит к росту избыточного давления и температуры в штреке (по сравнению со случаями, когда воздух не содержит дисперсных фаз – кривые 2, при наличии водяной завесы в воздухе – кривые 3 на рис. 4.11), вызванных возгоранием этой фазы (см. кривые 1 на рис. 4.11, а и рис. 4.11, б).

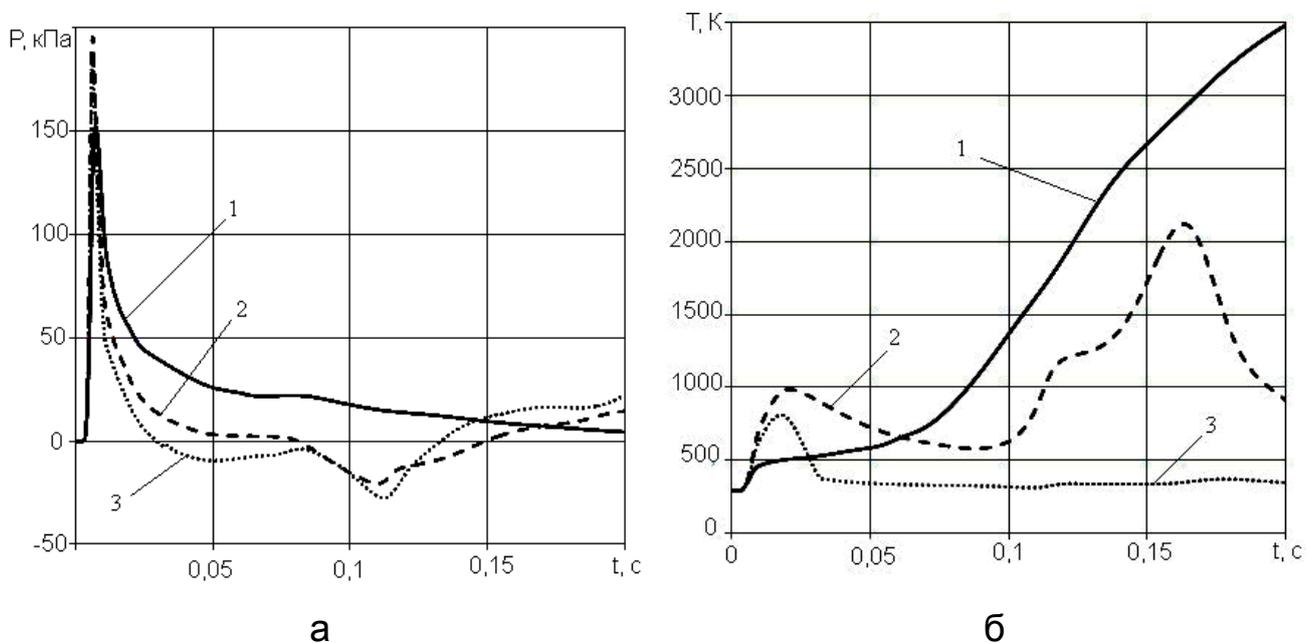


Рис. 4.11. Изменение избыточного давления (а) и температуры в контрольной точке (б): 1 – при наличии угольной пыли в воздухе; 2 – при наличии воздуха без дисперсных фаз; 3 – при наличии водяной завесы в воздухе

Наличие капель воды обеспечивает не только полное осаждение угольной пыли, но и дополнительное снижение избыточного давления и температуры за счет перехода жидкой фазы в парообразное состояние при прохождении вдоль штрека высокотемпературного облака продуктов сгорания метано-воздушной смеси (см. кривые 3 на рис. 4.11, а и рис. 4.11, б). Для сравнения приводятся результаты расчетов изменения избыточного давления и температуры в контрольной точке для случая, ко-

гда воздух в штреке не содержал дисперсных фаз (см. кривые 2 на рис. 4.11, а и рис. 4.11, б). Как видно из анализа данных, эффективность водяных завес снижается при гашении взрывов только метано-воздушной смеси (т.е. без участия во взрыве угольной пыли).

4.8. Моделирование системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной запылением воздушной среды

Рассматривая моделирование системы управления экологической безопасностью при запылении воздушной среды, следует отметить, что особую проблему представляют витающие частицы. Относительно небольшой по размеру и массе, такой состав может очень долго оставаться во взвешенном состоянии в воздушной среде.

Улавливание взвешенной пыли в воздухе происходит по следующему механизму:

- инерционный захват пылинок каплями воды, которые движутся с большой скоростью, с последующим оседанием их на грунт или погрузочный (разгрузочный) сыпучий материал;
- диффузионный захват частиц пыли в процессе осаждения капель воды через запыленное воздушное пространство;
- коагуляция смоченных частиц пыли в большие агрегаты и быстрое осаднение их на землю или погрузочный (разгрузочный) сыпучий материал;
- конденсатный захват частиц пыли капельками воды с последующим осаднением на землю.

Вероятность контакта частиц пыли с каплями воды зависит от расхода воды через форсунки, диаметра капель воды, запыленности воздуха, факторов орошения и определяется законом Пуассона

$$P = a \cdot e^{-a}$$

Здесь

$$a = \frac{3Q\sqrt{(200\Pi)^2}}{\pi d_k V_0 l^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}},$$

где Q – расход воды через форсунки, м³/с; Π – запыленность воздуха, мг/м³; d – диаметр капель жидкости, м; V₀ – начальная скорость полета капель жидкости, м/с; l – расстояние от форсунки, м; α – угол раствора факела форсунки, град.

Оценить целесообразность применения атомайзера при пылеподавлении можно расчетным путем. Проведена оценка эффективности двух способов распыла воды с целью снижения запыленности воздушной среды. В качестве критерия эффективности был выбран относительный расход воды.

Для сравнения расходов при разном способе распыла будем исходить из равенства площади поверхности капель: $\sigma_{\Sigma} = \sigma'_{\Sigma}$. Тогда величина относительного расхода воды при разных способах распыла может быть определена по формуле

$$\bar{G}_{H_2O} = \frac{G_{H_2O}}{G'_{H_2O}} = \frac{\sum_{i=1}^I \rho'(d_i) \sigma'_{ki}}{\sum_{i=1}^I \rho(d_i) \sigma_{ki}} \frac{\sum_{i=1}^I \rho(d_i) V_{ki}}{\sum_{i=1}^I \rho'(d_i) V'_{ki}}.$$

Получено, что при обычном распыле расход воды превышает расход воды при распыле с помощью атомайзера примерно в 2,8 раза.

При учете влияния фазового перехода при кипении капель воды (химической реакции горения частиц угольной пыли) на параметры движения газовой смеси были приняты следующие дополнительные данные.

Обычная форсунка обеспечивает распределение капель воды по размерам: $d \in [50,750] \cdot 10^{-6}$ м, $d_+ = 200 \cdot 10^{-6}$ м.

Атомайзер обеспечивает распределение капель воды по размерам: $d \in [10,150] \cdot 10^{-6}$ м, $d_+ = 75 \cdot 10^{-6}$ м.

Распределение частиц угольной пыли по размерам – $d \in [10,750] \cdot 10^{-6}$ м, $d_+ = 75 \cdot 10^{-6}$ м. Плотность угля $\rho_C = 1,5 \cdot 10^3$ кг/м³.

Низшая теплота сгорания:

- каменный уголь: $H_{иC} = 27 \cdot 10^6$ Дж/кг;
- антрацит: $H_{иC} = 28 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Температура возгорания угольной пыли (антрацита) – $T = 500^\circ$ С. Концентрация угольной пыли во взвешенном состоянии – $\rho_{C+} = 0,4$ кг/м³.

Проведенные теоретические исследования по диспергированию технологической жидкости, постановке многофазных дисперсных структур в пространстве и по времени, а также теоретическое определение параметров этих структур, необходимых для эффективной их работы по обеспечению экологической безопасности, позволяет рассмотреть технические решения для систем управления экологической безопасностью.

5. УСТРОЙСТВА, СОЗДАЮЩИЕ МНОГОФАЗНЫЕ ДИСПЕРСНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

5.1. Устройства типа «атомайзер» для систем управления экологической безопасностью

В устройствах типа «атомайзер» рабочий (жидкость) и пассивный (газ) потоки находятся в разных агрегатных состояниях, почти не изменяющихся в процессе смешения. По принципу действия и конструктивным особенностям атомайзеры можно отнести к жидкостно-газовым струйным аппаратам (ЖГСА).

В зависимости от типа струи различают жидкостно-газовые аппараты с компактной и диспергированной струями. В зависимости от соотношения температур рабочей и пассивной сред рассматриваемые аппараты разделяют также на две группы: термодинамическую, в которой смешиваемые потоки имеют существенно разные температуры, и изотермическую, когда разница температур незначительна и ею можно пренебречь при расчете гидравлических процессов эжектирования.

Методы расчета ЖГСА с диспергированной струей, как и других типов гидроструйных аппаратов, основываются также на эмпирических или полуэмпирических моделях. Законченной теории расчета в настоящее время нет. Это объясняется сложностью внутренних процессов в ЖГСА и их недостаточной изученностью. Поэтому весьма важной задачей является дальнейшее изучение механизма рабочего процесса ЖГСА с целью разработки строгой методики расчета.

С нашей точки зрения, наиболее перспективным является полуэмпирический подход, включающий в себя принятие той или иной физико-математической модели с разной степенью приближения к реальному физическому процессу, которая затем коррелируется эмпирическими данными [216, 217].

Диспергировать струю жидкости можно несколькими способами. В дальнейшем в конструкции атомайзера будем использовать механический способ диспергирования и диспергирование жидкости форсунками.

Для диспергирования жидкости механическим способом она подается на внутреннюю сторону мелкоячеистой кольцевой металлической сетки (рис. 5.1, 5.2), которая вращается электродвигателем с большой скоростью. Частота вращения вала двигателя регулируется системой управления. Жидкость, проходя через ячейки сетки, под действием центробежных сил отрывается в радиальном направлении в виде мелких капель. Эти капли подхватываются потоком воздуха, создаваемым вентилятором, и транспортируются этим потоком в зону, где возникает опасность.

Вид на атомайзер со стороны крепления вентилятора представлен на рис. 5.3, 5.4.

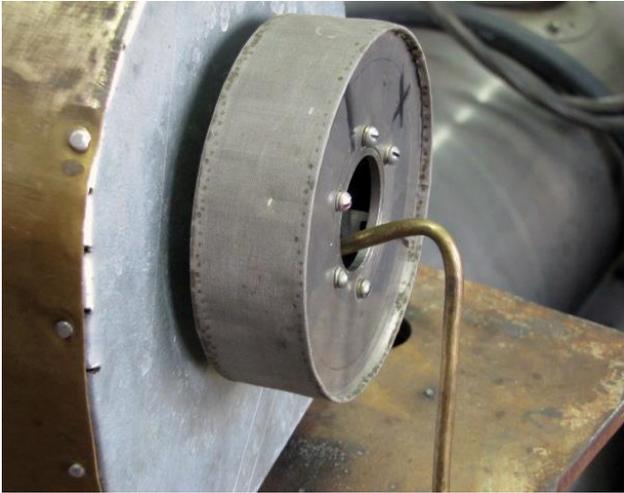


Рис. 5.1. Исследовательский образец диспергатора с электроприводом



Рис. 5.2. Механический диспергатор с электроприводом



Рис. 5.3. Вид на атомайзер со стороны вентилятора

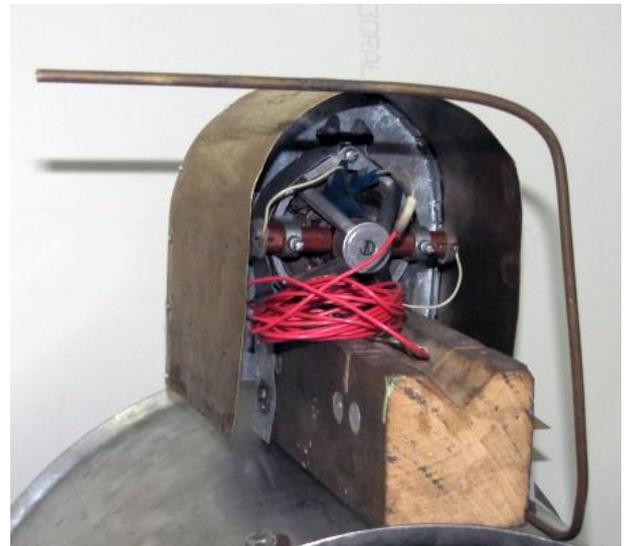


Рис. 5.4. Вид со стороны вентилятора исследовательского атомайзера

Для диспергирования жидкости форсунками (на этом принципе построены известные «снеговые пушки») было разработано устройство, содержащее распылительные форсунки в количестве 10 штук, которые расположены по окружности и жестко закреплены в кольцевом канале (рис. 5.5, 5.6).



Рис. 5.5. Диспергатор, использующий для распыления жидкости форсунки



Рис. 5.6. Крепление форсуночного диспергатора к вентилятору

Как и в случае механического диспергирования жидкости, кольцо с форсунками крепилось к вентилятору, снабженному системой управления частоты вращения вала двигателя вентилятора. Последнее позволяет регулировать скорость воздушного потока, транспортирующего частицы жидкости в рабочую зону.

5.2. Однофазные струйно-центробежные распылители для систем управления экологической безопасностью

Расчет центробежного распылителя производился согласно методике, представленной в работе [76]. Истечение жидкости из сопла происходит в виде полого конуса со скоростью

$$w = w_{пр}/\varepsilon, \quad (5.1)$$

где $w_{пр}$ – приведенная скорость струи, рассчитываемая на полное сечение сопла; $\varepsilon = 1 - (r_B/r_C)$ – коэффициент живого сечения сопла; r_C , r_B – радиус сопла и внутренний радиус кольцевого сечения струи.

Коэффициент расхода для центробежной форсунки:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{A_D^2}{1-\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon^2}}}, \quad (5.2)$$

где $R_{\text{вх}}$ – плечо завихрения; $r_{\text{вх}}$ – радиус входных каналов; z – число каналов,

$$A_D = \frac{A/\varepsilon_{\text{вх}}}{1 + \frac{\lambda}{2} \left(B^2/\varepsilon_{\text{вх}} z - A/\varepsilon_{\text{вх}} \right)}, \quad (5.3)$$

где $A = \frac{R_{\text{вх}} r_c}{(z r_{\text{вх}}^2)}$ – геометрическая характеристика центробежного распылителя; $B = R_{\text{вх}}/r_{\text{вх}}$ – геометрический параметр центробежной форсунки; $\varepsilon_{\text{вх}} = 0,85 \dots 0,9$ – коэффициент сужения потока во входных каналах; λ – коэффициент трения.

Значение коэффициента трения определяется по формуле

$$\text{tg} \lambda = \frac{25,8}{(\text{lg} \text{Re}_{\text{вх}})^{2,58}} - 2, \quad (5.4)$$

где $\text{Re}_{\text{вх}} = w_{\text{вх}} d_{\text{вх}}/\nu$ – число Re по условиям на входе воды в камеру завихрения; $w_{\text{вх}} = Q/(z r_{\text{вх}}^2)$ – средняя скорость жидкости во входных каналах; $d_{\text{вх}}$ – эквивалентный диаметр отверстия, соответствующего суммарной площади всех входных каналов; ν – кинематическая вязкость жидкости.

Для получения большего угла раскрытия факела значение геометрического параметра B должно быть не более 5 [280].

Разработка конструкции струйно-центробежного распылителя. Конструктивная схема однофазного струйно-центробежного распылителя приведена на рис. 5.7. При разработке конструкции был учтен многолетний опыт создания подобных устройств в других областях техники, связанных с распыливанием жидкости, таких, как ракетная техника и двигателестроение, а также устройств для пожаротушения [76, 227, 296, 312, 319, 321, 322].

Струйно-центробежный распылитель состоит из цилиндрической части с внутренним диаметром 32 мм, с одной стороны которой установлен штуцер для присоединения резинового шланга. С другой стороны размещена коническая часть, на конце которой находятся сменные насадки различного диаметра. Насадки фиксируются на конце распылителя с помощью накидной гайки. Такая конструкция распылителя позволяет более точно согласовать его с условиями работы на местности, а именно скорректировать дальность струи и, соответственно, расход воды. В цилин-

дрической части распылителя установлена вставка (завихритель) с центральным отверстием диаметром 6 мм и пазами, расположенными по образующей шириной 4 мм и глубиной 2,5 мм и наклоненными к оси под углом α . Она предназначена для создания закрутки потока, увеличения диаметра конуса распыла и улучшения дисперсности. При проведении испытаний глубина, ширина пазов и угол наклона варьировались с целью получения наиболее оптимальных параметров.

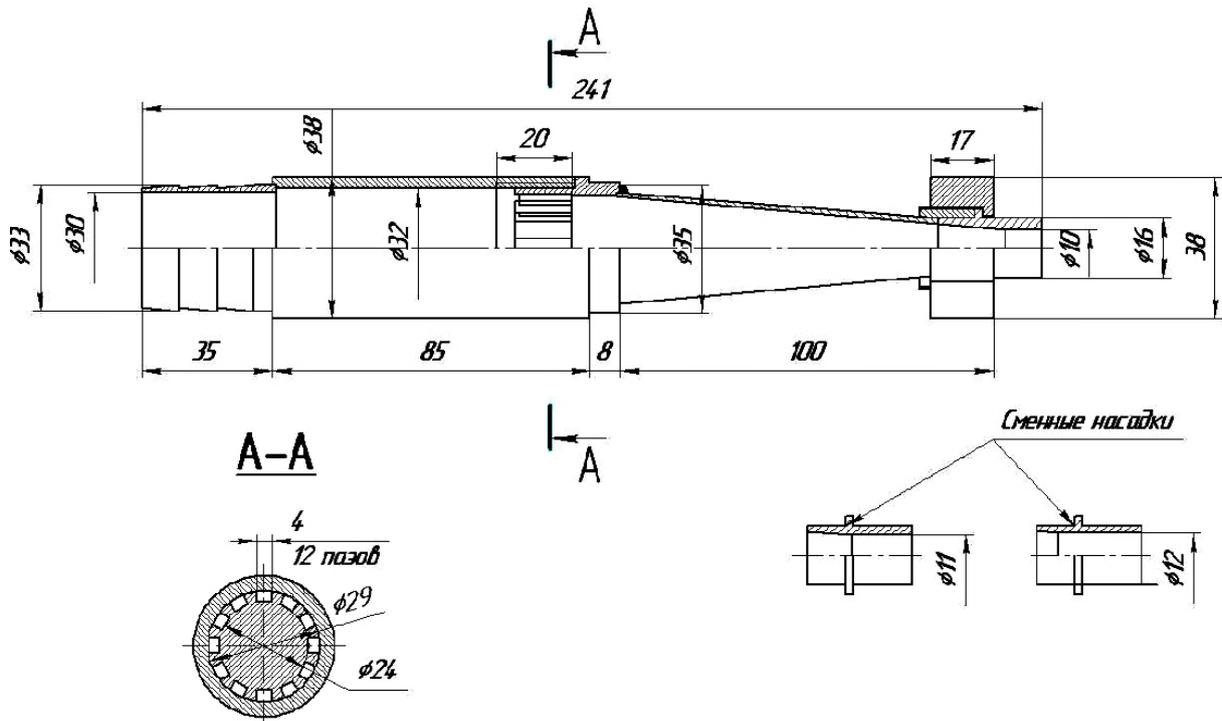


Рис. 5.7. Конструктивная схема струйно-центробежного распылителя

На основе предварительных испытаний выбрано центральное размещение вставки-завихрителя, поскольку расположение ее на конце конической части, как это делается в пожарных стволах [107], не позволяет получить достаточно мелкодисперсную структуру.

Все распылители устанавливаются на держателе со штангой, которая даст возможность поворачивать распылитель по азимуту и по углу наклона к горизонту. Конструкция держателя приведена на рис. 5.8.

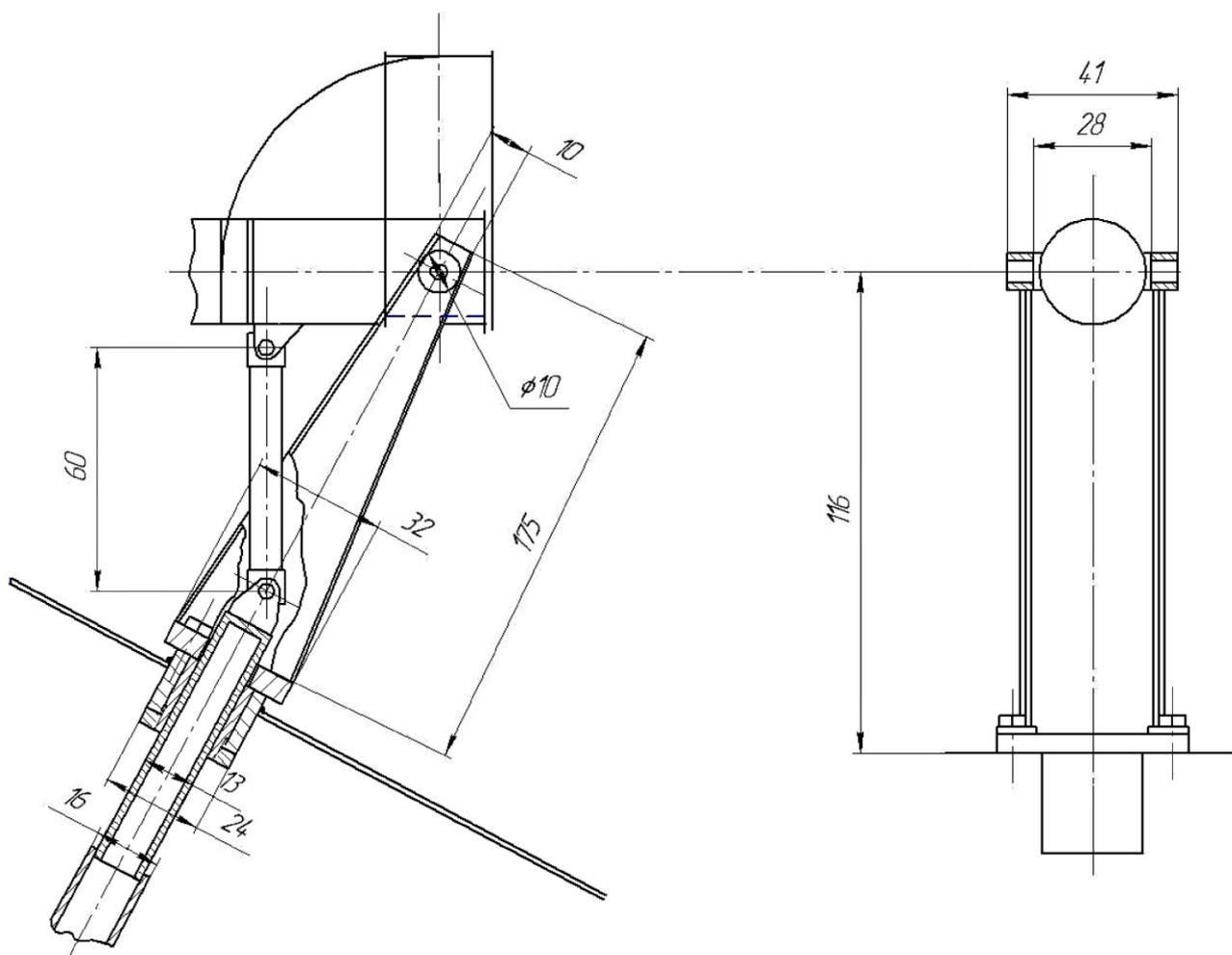


Рис. 5.8. Конструкция держателя распылителей

5.3. Некоторые характеристики однофазного струйно-центробежного распылителя для систем управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур

Можно привести некоторые экспериментальные характеристики струйно-центробежного распылителя (СЦР) по дальности, дисперсности и площади орошаемой поверхности, полученные экспериментально.

В качестве струйно-центробежного распылителя рассмотрим распылители с различными диаметрами выходного сопла: 1) $D = 9$ мм, 2) $D = 10$ мм, 3) $D = 12$ мм и с центральным телом диаметром 7,2 мм. Схема такого распылителя и варьируемые размеры приведены на рис. 5.9. Все остальные размеры соответствуют рис. 5.7.

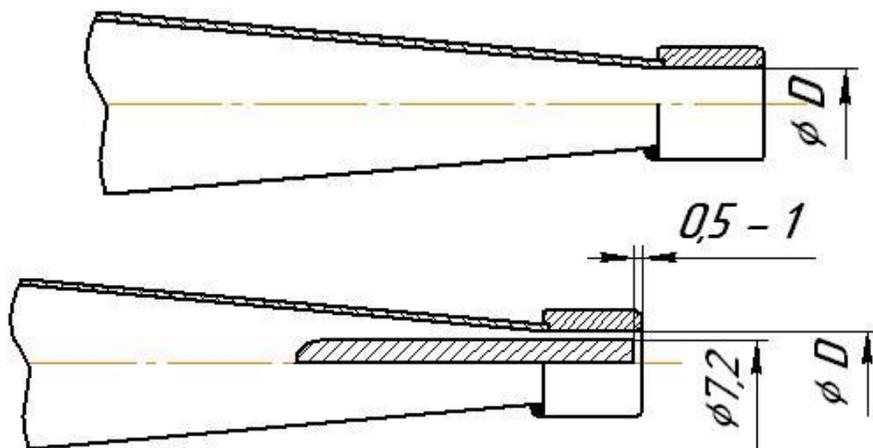


Рис. 5.9. Конструктивные варианты распылителя при испытаниях по вариантам 1, 2 (верхний) и 3 (нижний)

Характеристики СЦР представлены в графическом виде на рис. 5.10 и 5.11.

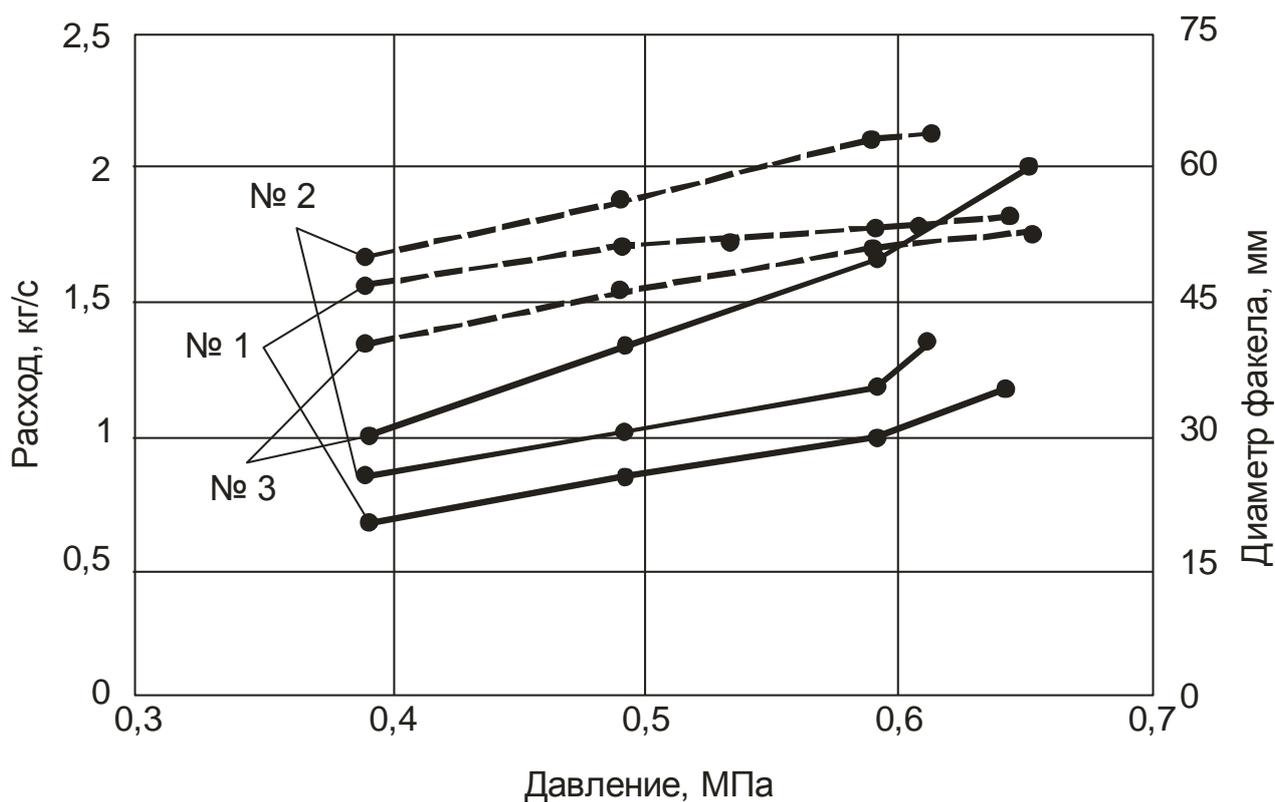


Рис. 5.10. Расход воды и диаметр факела распыла в зависимости от абсолютного давления по результатам испытаний по серии 1:
 ----- – G, кг/с; ———— – D, мм

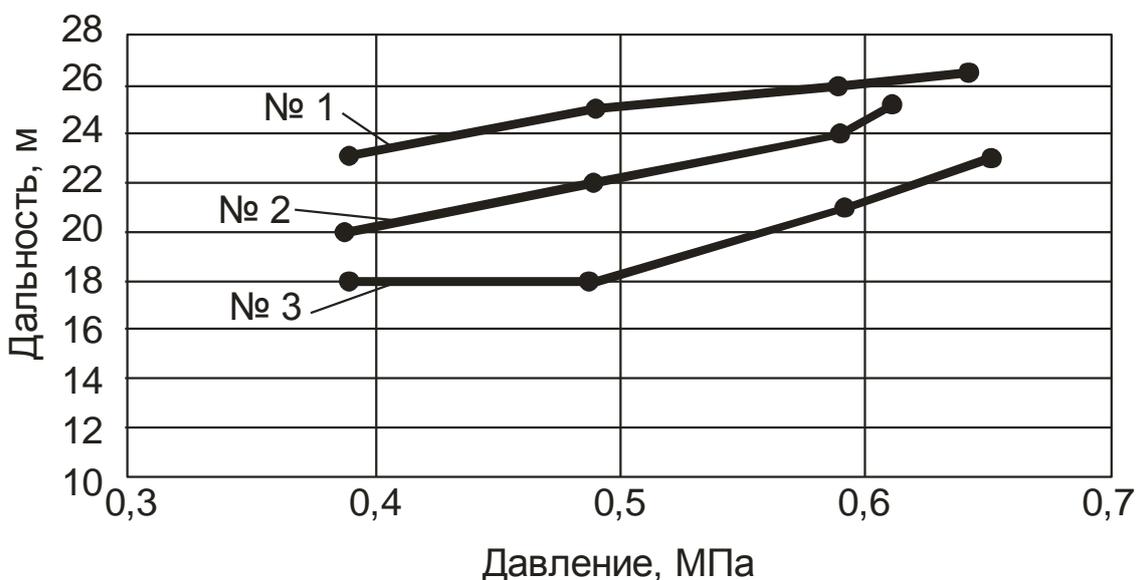


Рис. 5.11. Дальность струи в зависимости от абсолютного давления по результатам испытаний по серии 1

Струя, получаемая в результате распыла, – узкая, форсунка не обеспечивает достаточную дисперсность, капли крупные размером до 5 мм. При диаметре сопла 9 мм (вариант 1) дальность получается наибольшей, а диаметр факела – наименьшим. Наличие центрального тела (вариант 3) позволило увеличить диаметр факела распыла, но уменьшило дальность. Влияние на размер капель не зарегистрировано.

При проведении проливки СЦР с завихрителем, имеющим по образующей цилиндра пазы шириной 3 мм и глубиной 5 мм, как показано на рис. 5.12, испытано 3 варианта завихрителей:

- угол наклона паза $\alpha = 7^\circ$ с открытым центральным отверстием;
- угол наклона паза $\alpha = 6^\circ$ с открытым центральным отверстием;
- угол наклона паза $\alpha = 6^\circ$ с заглушенным центральным отверстием

Ø 6;

На рис. 5.13 и 5.14 представлены графики, построенные по этим данным.

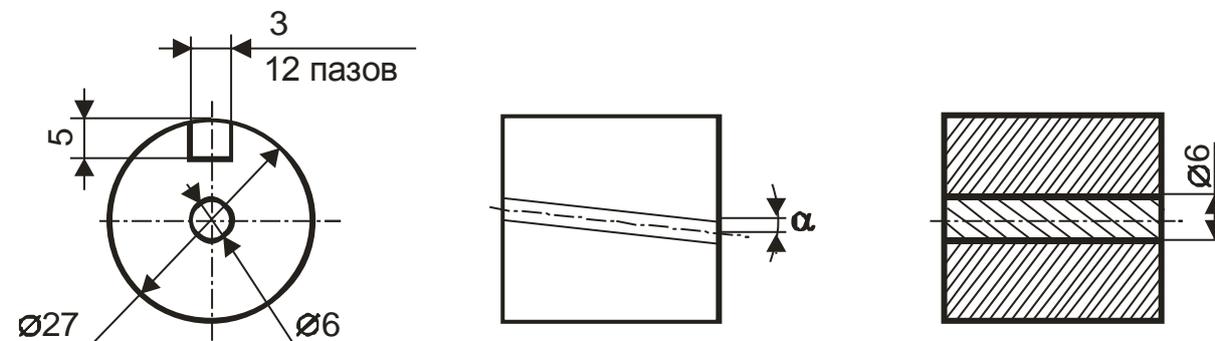


Рис. 5.12. Конструктивные параметры распылителя 2-й серии

Испытания показали существенное улучшение качества распыла и увеличение диаметра факела. При давлениях 0,48 и 0,54 МПа размер капель составлял 100 – 200 мкм в вариантах 1 и 2. С увеличением закрутки (угол наклона пазов 7°) диаметр конуса распыла возрастает, а крупность капель уменьшается. Дальность струи меньше, чем в испытаниях серии 1, но ее значение находится в непосредственной близости к требуемому. Вариант 3 показал не совсем удовлетворительные результаты как по качеству распыла, так и по дальности.

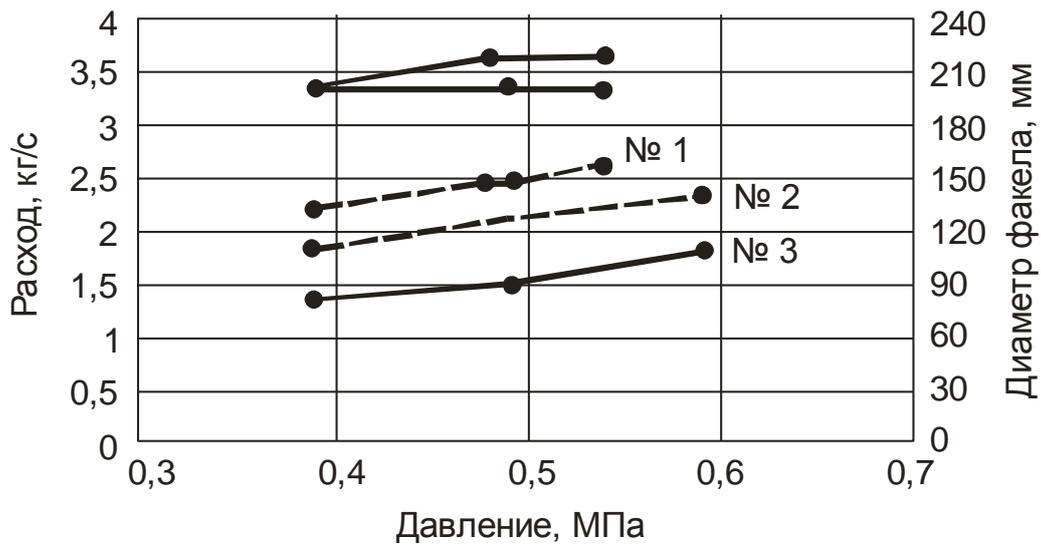


Рис. 5.13. Расход воды и диаметр факела распыла в зависимости от давления: - - - - - G, кг/с; — — — — — D, мм

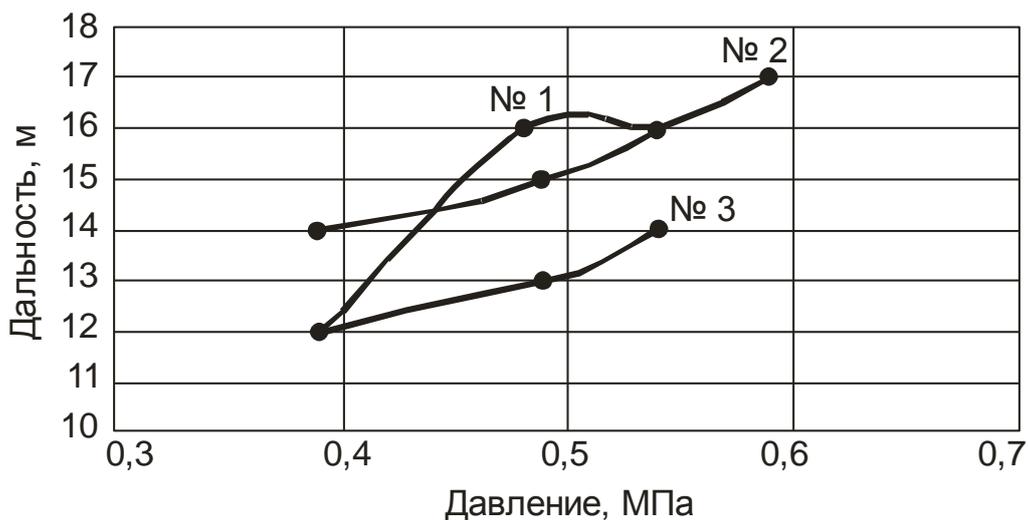


Рис. 5.14. Дальность струи в зависимости от абсолютного давления по результатам испытаний по серии 2

Если необходимо увеличить дальность струи, в конструкцию струйно-центробежного распылителя можно ввести изменения, приведенные на рис. 5.15.

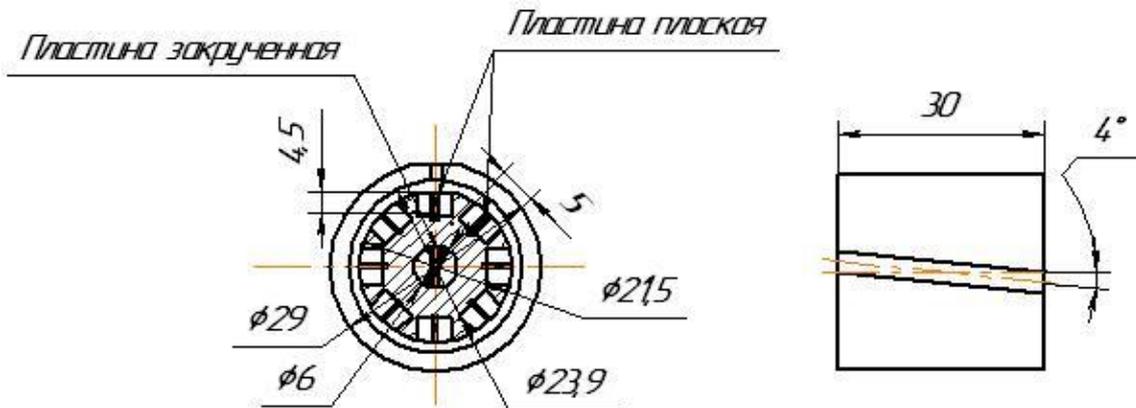


Рис. 5.15. Конструктивная схема доработок завихрителя СЦР

При этом исследованы следующие варианты:

- вставка длиной 30 мм с периферийными каналами под углом наклона 4° к оси;
 - в центральное отверстие $\varnothing 6$ вставлена пластина, закрученная вокруг продольной оси;
 - в периферийные пазы вставлены плоские пластины толщиной 1 мм.
- Результаты испытаний представлены на рис. 5.16, 5.17.

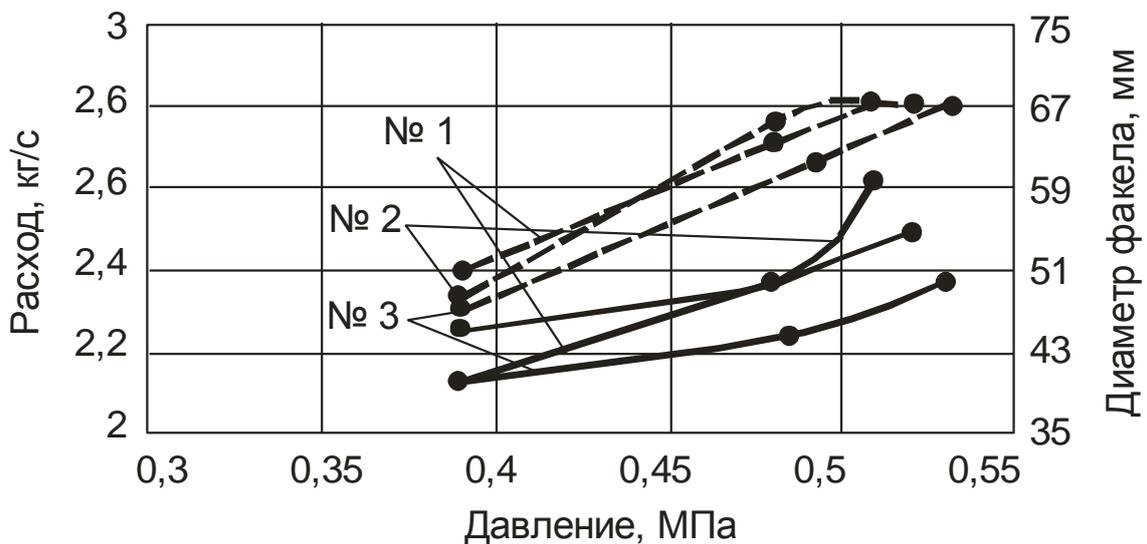


Рис. 5.16. Расход воды и диаметр факела распыла в зависимости от давления

Данные доработки позволяют существенно увеличить дальность струи при уменьшении диаметра конуса распыла. Струя однородная с крупными каплями.

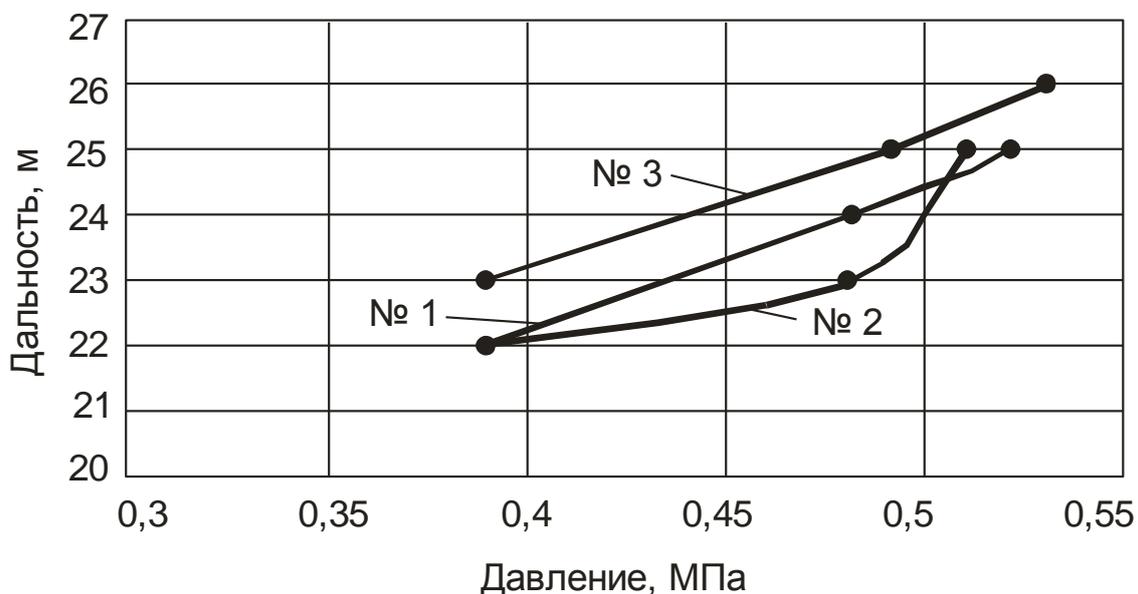


Рис. 5.17. Дальность струи в зависимости от абсолютного давления по результатам испытаний по серии 5

5.4. Водовоздушные эжекторные распылители для систем управления экологической безопасностью

Инжекторами, или струйными аппаратами, называются устройства, в которых осуществляется процесс инъекции, т.е. передача кинетической энергии от одного потока к другому путем непосредственного контакта (смешения) потоков.

Смешиваемые потоки могут находиться в одной и той же фазе (жидкой, газовой, паровой) или в разных фазах (пар и жидкость, газ и твердое тело и др.). В процессе смешения фазовое состояние смешиваемых потоков может оставаться неизменным или же изменяться (например, пар может конденсироваться в жидкость). Поток, вступающий в процесс смешения с большей скоростью, называется рабочим, а с меньшей — инжекти-

руемым. На рис. 5.18 показана наиболее общая схема струйного аппарата [76].

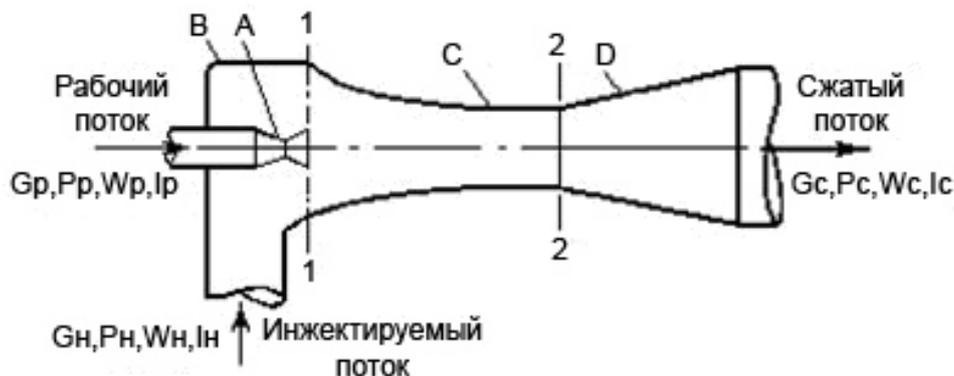


Рис. 5.18. Схема струйного аппарата: А – рабочее сопло; В – приемная камера; С – камера смешения; D – диффузор; где G_n, P_n, W_n, I_n – соответственно расход, давление, скорость, энтальпия инжектируемого потока; G_p, P_p, W_p, I_p – то же для рабочего потока; G_c, P_c, W_c, I_c – то же для потока смеси; 1 – 1 – входное сечение камеры смешения (КС); 2 – 2 – выходное сечение КС

Принцип действия эжектора состоит в следующем: рабочая среда – вода – подается под давлением к суживающемуся соплу, на выходе из которого она приобретает большую скорость. Вытекающая из сопла струя воды увлекает за собой инжектируемый поток воздуха, поступающего через патрубок. Далее потоки поступают в камеру смешения (КС), где происходит выравнивание скоростей, сопровождающееся повышением давления. Из КС поток поступает в диффузор, где происходит дальнейший рост давления. Давление смешанного потока на выходе из диффузора выше давления инжектируемого потока, поступающего в приемную камеру, но ниже давления рабочего потока, т.е. $P_n < P_c < P_p$.

Наряду с показанной на рис. 5.18 традиционной формой проточной части эжектор может иметь несколько рабочих сопел, через которые вода подается в камеру смешения, а также может быть несколько патрубков для подвода инжектируемого потока воздуха. Форма и место присоединения этих патрубков могут быть различными.

Экспериментальные исследования показали также целесообразность увеличения длины камеры смешения до 40 – 50 вместо 8 – 10 калибров для однофазных струйных аппаратов.

Это связано с тем, что образование однородной газожидкостной эмульсии требует большей длины пути перемешивания, чем выравнивание профиля скоростей однофазного потока. Процесс разрушения струи можно представить следующим образом. Струя рабочей жидкости в газовой среде разрушается в результате того, что капли выпадают из ядра

струи. Разрушение струи начинается с появления ряби (волн) на ее поверхности на расстоянии нескольких диаметров от среза сопла. Затем амплитуда волн возрастает до тех пор, пока капли не начнут выпадать в окружающую среду. По мере развития процесса ядро струи постепенно уменьшается и исчезает. Расстояние, на котором происходит разрушение струи, считается зоной перемешивания, в которой сплошной средой является инжестируемый воздух. После скачкообразного повышения давления сплошной средой становится жидкость, в которой распределены пузырьки воздуха.

Длина камеры должна быть достаточной для завершения смешения. При недостаточной длине камеры смешения зона перемешивания переходит в диффузор, что снижает эффективность водовоздушного эжектора. Для исследованного в работе [169] диапазона геометрических параметров $f_3/f_{p1} = 6,6 \dots 2,2$ длина перемешивания составляла соответственно 32...12 калибров камеры смешения.

Оптимальная длина камеры смешения для сопла с прямоугольными кромками и одним отверстием

$$\left(\frac{l_{кс}}{d_{p1}} \right)_{опт} = 15 \left(\frac{f_3}{f_{p1}} - 1 \right),$$

где $l_{кс}$ – длина камеры смешения; d_{p1} – диаметр рабочего сопла; f_3 – площадь сечения цилиндрической части камеры смешения; f_{p1} – площадь сечения рабочего сопла. Характерной особенностью условий работы водовоздушного эжектора является большое различие плотностей воды и инжестируемого воздуха. Отношение этих величин может превышать 10^4 . Массовые коэффициенты инжестии достигают обычно величин 10^{-5} , а объемные коэффициенты инжестии находятся в диапазоне 0,2...3,0.

Взаимное расположение проточных каналов для воздуха и воды может быть различным, как показано на рис. 5.19 [215].

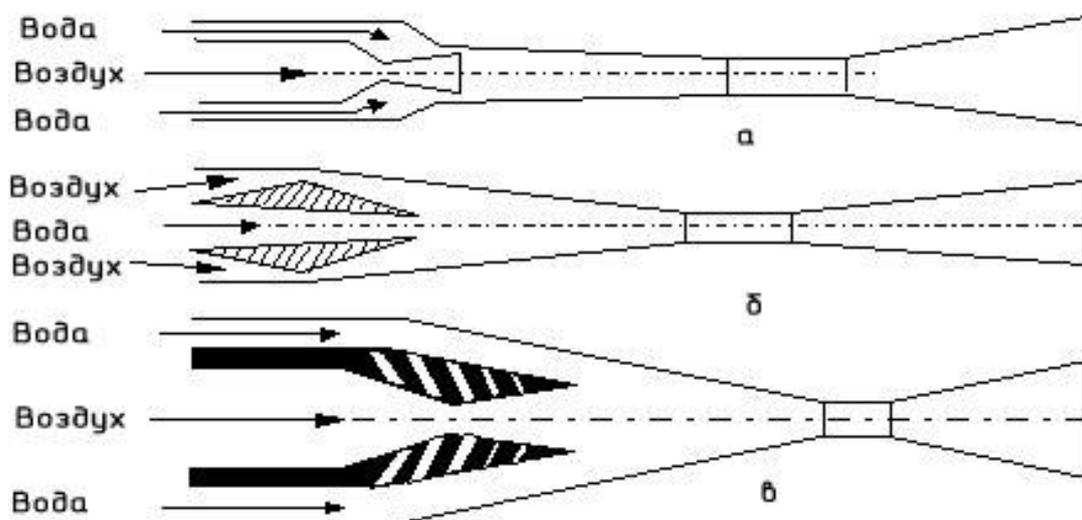


Рис. 5.19. Схемы эжекторов

Выбор той или иной схемы зависит от поставленной задачи. Так, основное преимущество схемы с центральным подводом воздуха состоит в том, что здесь К.П.Д. сопла при прочих равных условиях имеет наибольшее значение. Схема с центральным подводом жидкой фазы, несмотря на снижение К.П.Д. парового сопла, позволяет лучше организовать процессы в КС и снизить потери на стенках КС. Кроме того, для установок с малой производительностью улучшается К.П.Д. жидкостного сопла, т.к. в случае периферийной подачи жидкости зазоры для ее прохода могут составлять десятые доли мм. Это особенно важно для аппаратов, использующих вязкие жидкости и жидкости, имеющие включения в виде загрязняющих примесей. Также необходимо отметить, что центральный подвод жидкости эффективен в случае если давление жидкости на входе в аппарат больше давления воздуха или равно ему. В этом случае поток жидкости целесообразно использовать в качестве рабочего потока.

Использованная методика расчета водовоздушного эжектора. Особенностью водовоздушного эжектора является существенное отличие плотностей взаимодействующих сред, поэтому применение уравнения импульсов для расчета процесса может привести к значительной ошибке. Во многих случаях методика расчета представляет собой набор эмпирических уравнений, которые дают неплохое совпадение с экспериментом. Данная методика приводится в соответствии с изложенной в [76, 224].

Исходные данные:

давление инжектируемого воздуха - p_n ;

расход инжектируемого воздуха - G_n ;

температура инжектируемого воздуха - t_n ;

рабочее давление воды перед соплом - p_p ;

температура воды - t_p ;

давление в камере смешения - p_c ;

сжатая водовоздушная смесь выбрасывается в атмосферу.

Определяем максимальный объемный коэффициент инжекции:

$$u_0 = 0,85 \sqrt{\frac{\Delta p_p}{\Delta p_c} - 1} ,$$

где $\Delta p_p = p_p - p_n$; $\Delta p_c = p_c - p_n$.

Основной геометрический параметр эжектора:

$$(f_3 / f_{p1})_{\text{опт}} = \Delta p_p / \Delta p_c .$$

Решаем уравнение характеристики водовоздушного эжектора:

$$\Delta p_c / \Delta p_p = 1,75 \frac{f_{p1}}{f_3} - 1,07 \left(\frac{f_{p1}}{f_3} \right)^2 (1 + u_0)^2 ,$$

где $u_0 = V_B / V_p$ - объемный коэффициент инжекции.

Определяем объемный коэффициент инжекции:

$$u_0 = \sqrt{\frac{1,75 \frac{f_{p1}}{f_3} - \frac{\Delta p_c}{\Delta p_p}}{1,07 \left(\frac{f_{p1}}{f_3} \right)^2} - 1} .$$

По результатам расчетов строим зависимость $\Delta p_c / \Delta p_p = f(u_0)$ при расчетном значении соотношения площадей сечения цилиндрической части камеры смешения и рабочего сопла f_3 / f_{p1} , заданном значении G_H и при различных давлениях инжектируемого воздуха p_H .

Определяется объемный расход водовоздушной смеси:

$$V_B = \frac{G_H R_B T_p}{(p_H - p_H)} ,$$

где p_H – давление насыщения инжектируемого воздуха при заданной температуре.

Вычисляем объемный расход рабочей воды:

$$V_p = V_B / u_0 .$$

Площадь сечения рабочего сопла:

$$f_{p1} = \frac{V_{p1}}{\phi \cdot 3600 \sqrt{2 \Delta p_p 10^6 / \rho_p}} ,$$

где $\phi = 0,95$ – коэффициент расхода.

Диаметр камеры смешения:

$$d_3 = d_{p1} \sqrt{f_3 / f_{p1}} .$$

Максимальное значение коэффициента инжекции:

$$u_0 = \frac{0,35(p_p - p_c)}{(p_c / 2,7) - p_H} .$$

Оптимальное соотношение сечений камеры смешения и рабочего сопла:

$$(f_3 / f_{p1})_{\text{опт}} = 1,25u_0^{\text{макс}} + 1 \quad .$$

Минимальное давление рабочей воды, при котором возможна работа эжектора:

$$p_p^{\text{мин}} = \frac{p_c}{2} (f_3 / f_{p1})_{\text{опт}} \quad .$$

Определяем длину камеры смешения:

$$l_{\text{КС}} = m d_{1\text{ЭКВ}} \left[(f_3 / f_{p1})_{\text{опт}} - 1 \right] \quad ,$$

где $m = 10 \dots 20$; $d_{1\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный диаметр сопла с площадью сечения, равной суммарной площади сечения сопел многоструйного эжектора.

Строим зависимость $l_{\text{КС}} = f(u_0)$.

Результаты расчета водовоздушного эжектора. В результате расчетов построены зависимости $\Delta p_c / \Delta p_p = f(u_0)$, $p_{\text{рмин}} = f(u_0)$ при давлении инжектируемого воздуха p_n , изменяющемся в диапазоне от 15 до 96 кПа, и различных значениях массового расхода инжектируемого воздуха G_n . Расчеты позволяют определить геометрические параметры эжектора, а именно: диаметр рабочего сопла d_{p1} , диаметр камеры смешения d_3 и длину камеры смешения $l_{\text{КС}}$, а также их зависимость от коэффициента инжекции в тех же диапазонах изменения давления инжектируемого воздуха и массового расхода инжектируемого воздуха. Давление рабочего потока 0,2...0,7 МПа. Как пример можно представить расчеты при $G_n = 6,2$ кг/ч (рис. 5.20).

Конструкция водовоздушного эжектора представлена на рис. 5.21. Он состоит из цилиндрической части с резьбовым штуцером для подключения шланга подачи воды. С другой стороны расположена камера смешения, состоящая из конической и цилиндрической частей диаметром 16 мм. Воздух из атмосферы инжектируется через тангенциально расположенные каналы в центральную камеру диаметром 16 мм. Такая подача инжектируемого воздуха осуществлена для интенсификации разрушения струи с целью обеспечения мелкодисперсного распыла. На рис. 5.21 показано размещение кромки выходного сопла подачи воздуха на одном уровне со входом в коническую часть камеры смешения. В дальнейшем при проведении испытаний будут варьироваться оптимальное положение рабочего сопла подачи воздуха, а также величина его наружного и внутреннего диаметров.

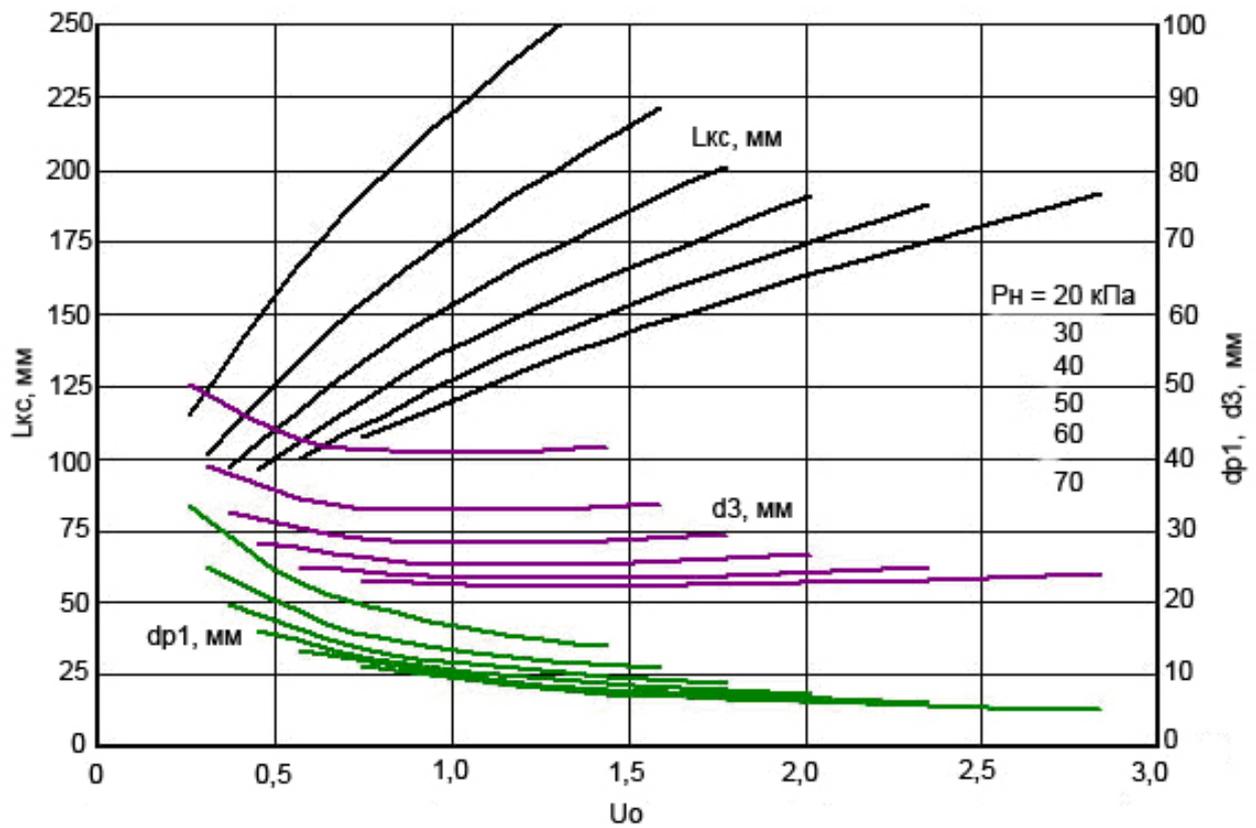
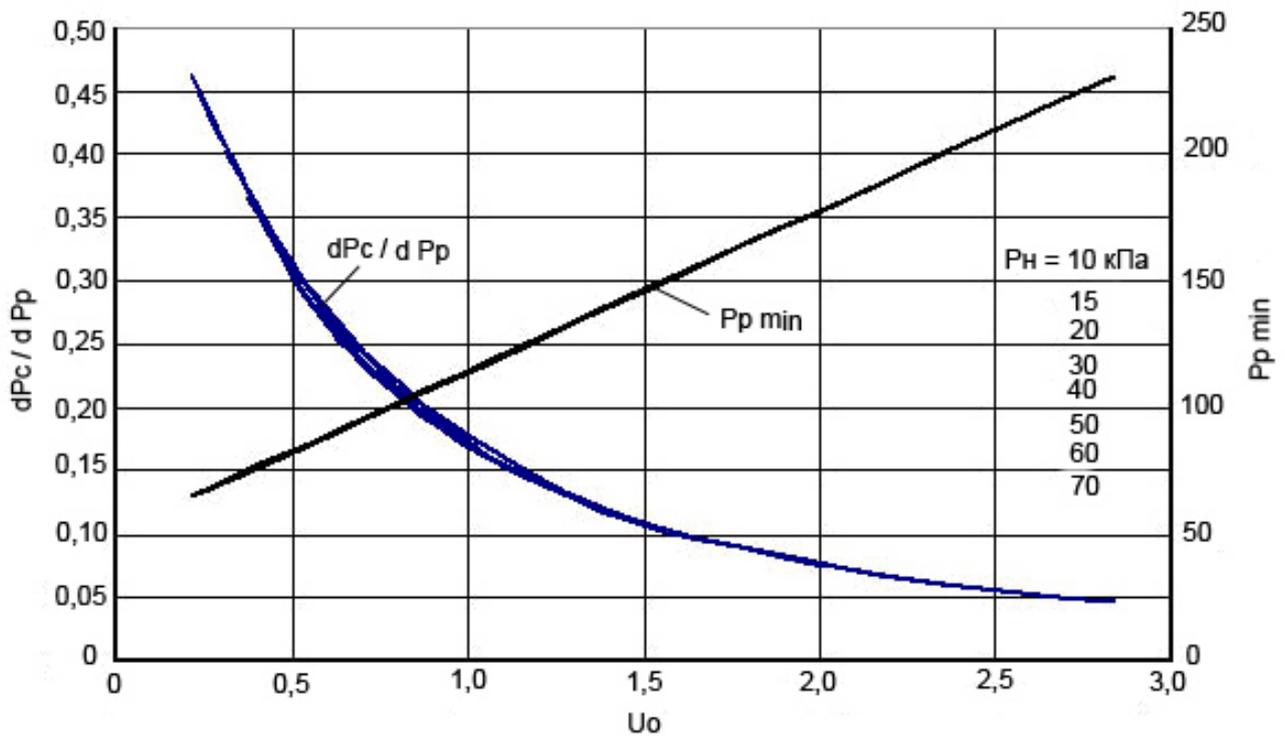


Рис. 5.20. Характеристики водовоздушного эжектора при различных давлениях всасывания (при $G_n = 6,2$ кг/ч, $P_p = 0,7$ МПа)

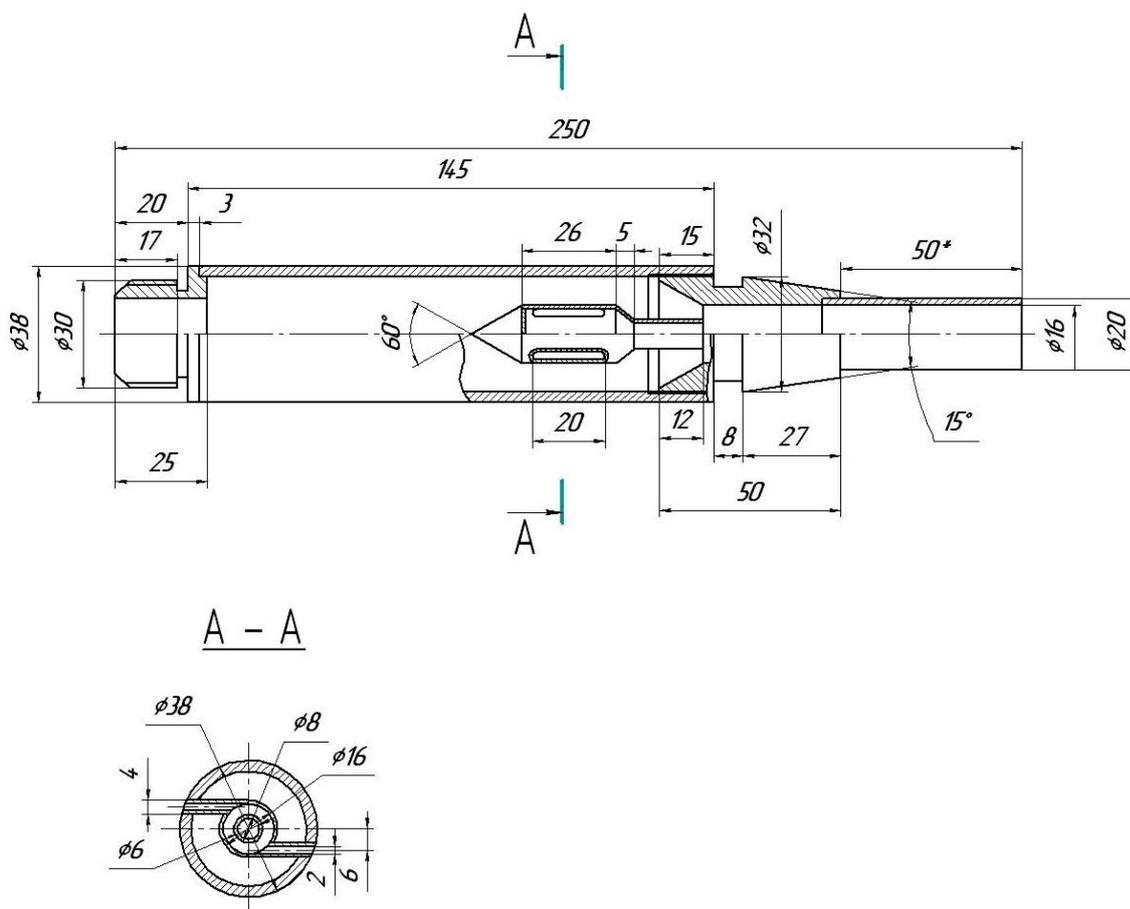


Рис. 5.21. Конструктивная схема водовоздушного эжектора

5.5. Некоторые характеристики водовоздушных эжекторных распылителей для систем управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур

Разработанная и изготовленная конструкция эжектора (рис. 5.22) должна снизить расход воды и получить мелкодисперсную структуру распыла путем создания дополнительной закрутки потока при тангенциальном подводе инжектируемого воздуха в камеру смешения. Данные испытания направлены на выбор оптимальных геометрических параметров камеры смешения, относительного расположения сопла и его размеров. Это обусловило проведение ряда серий испытаний с различными конструктивными параметрами.

При проливке водовоздушного эжектора с конструктивными параметрами, приведенными на рис. 5.23, получены характеристики по расходу и диаметру конуса распыла, представленные на рис. 5.24, 5.25.



Рис. 5.22. Внешний вид водовоздушного эжекторного распылителя

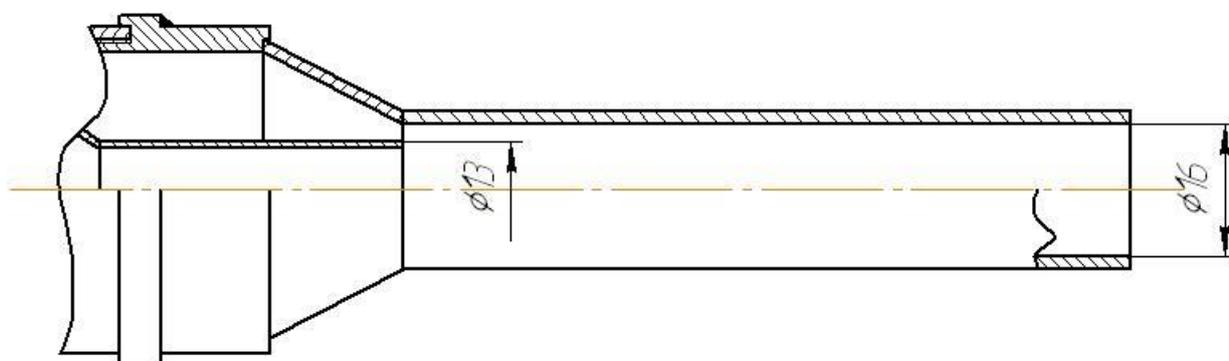


Рис. 5.23. Конструктивные параметры испытываемого ВВЭ

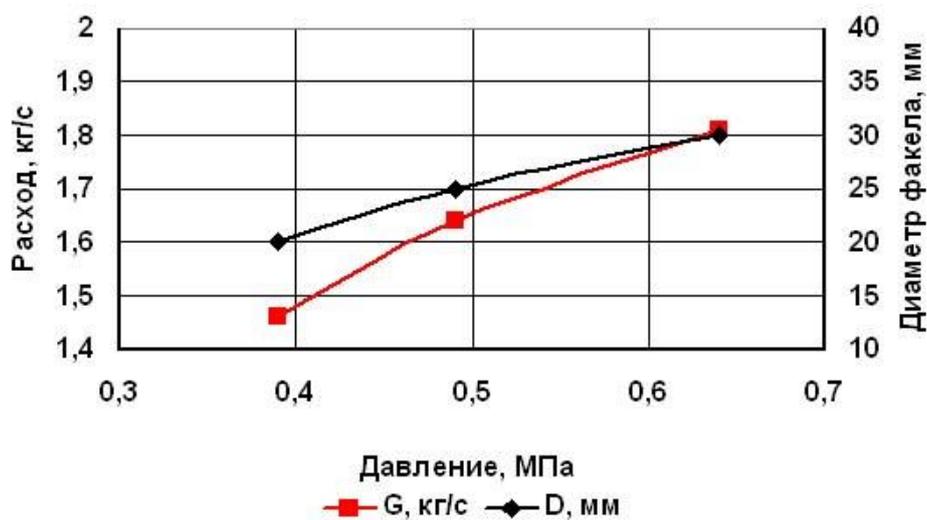


Рис. 5.24. Характеристики водовоздушного эжектора по расходу и диаметру конуса распыла

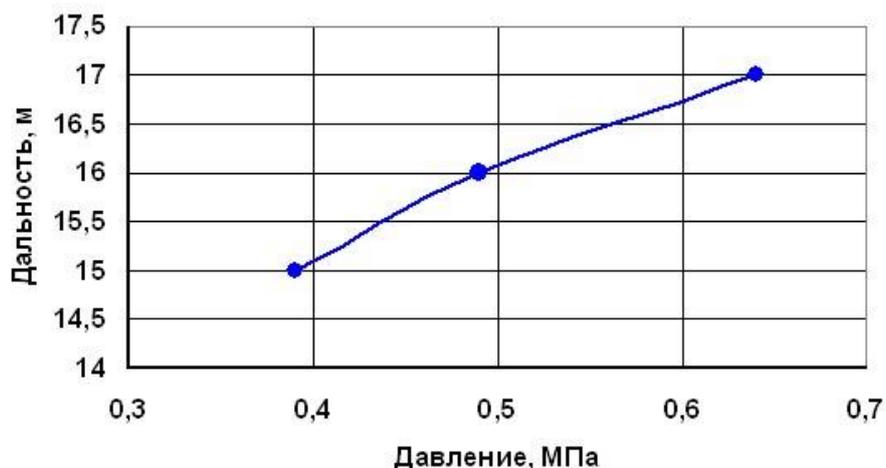


Рис. 5.25. Дальность струи в зависимости от давления

Результаты испытаний показали, что расход воды уменьшился по сравнению со струйно-центробежным распылителем, в то же время уменьшились дальность и диаметр конуса факела. Эжектор позволяет получить хорошее качество распыла с мелкими размерами капель. Этому способствует поток инжектируемого воздуха. Максимальное разрежение в камере смешения составляет 0,02 МПа.

При варьировании внутреннего и наружного диаметров сопла подачи воздуха, как показано на рис. 5.26, характеристики водовоздушного эжектора по расходу и диаметру конуса распыла будут иметь характеристики, представленные на рис. 5.27, 5.28.

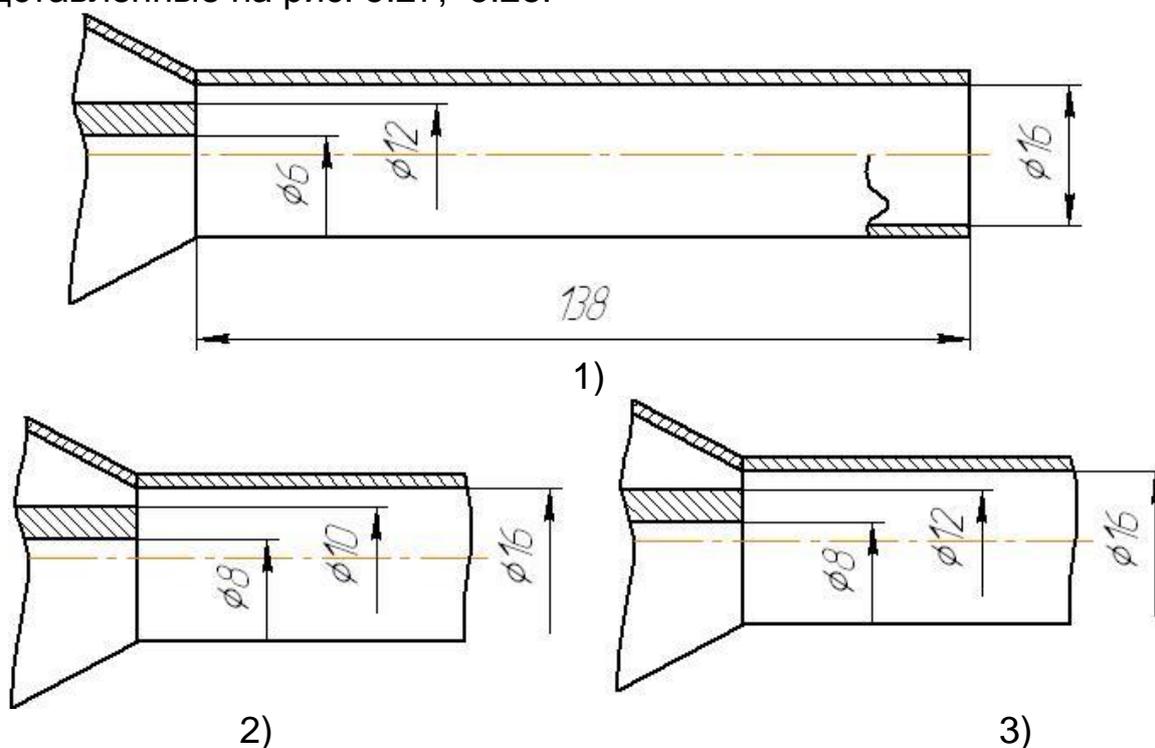


Рис. 5.26. Варьируемые геометрические параметры ВВЭ

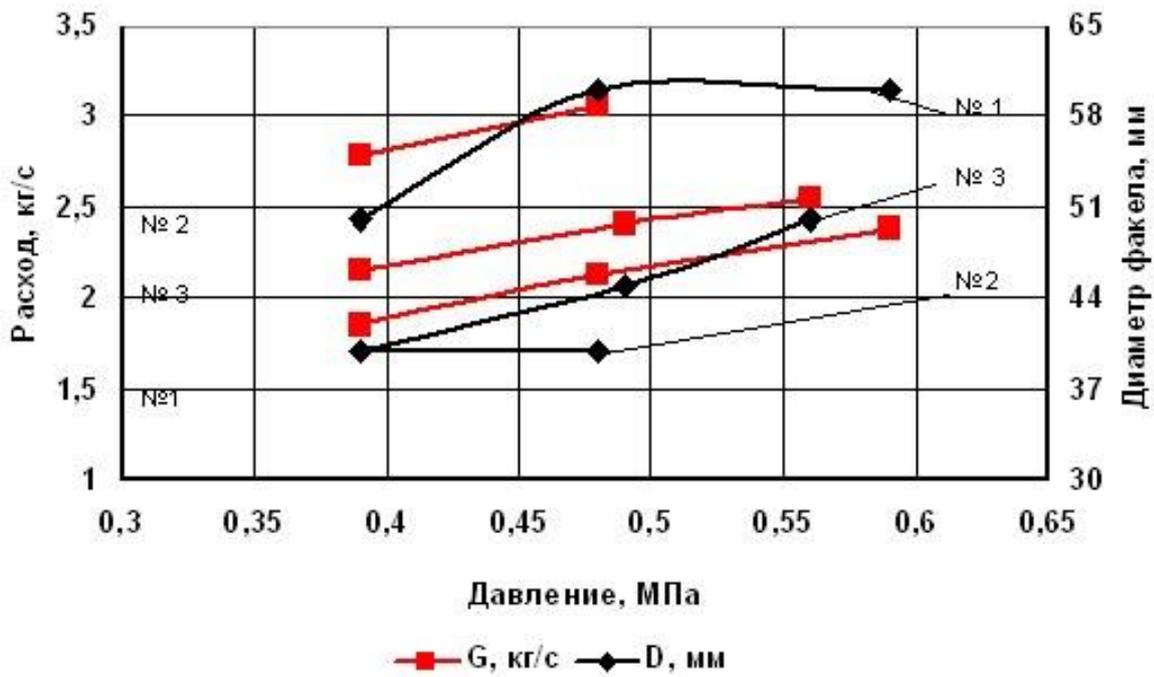


Рис. 5.27. Характеристики водовоздушного эжектора по расходу и диаметру конуса распыла

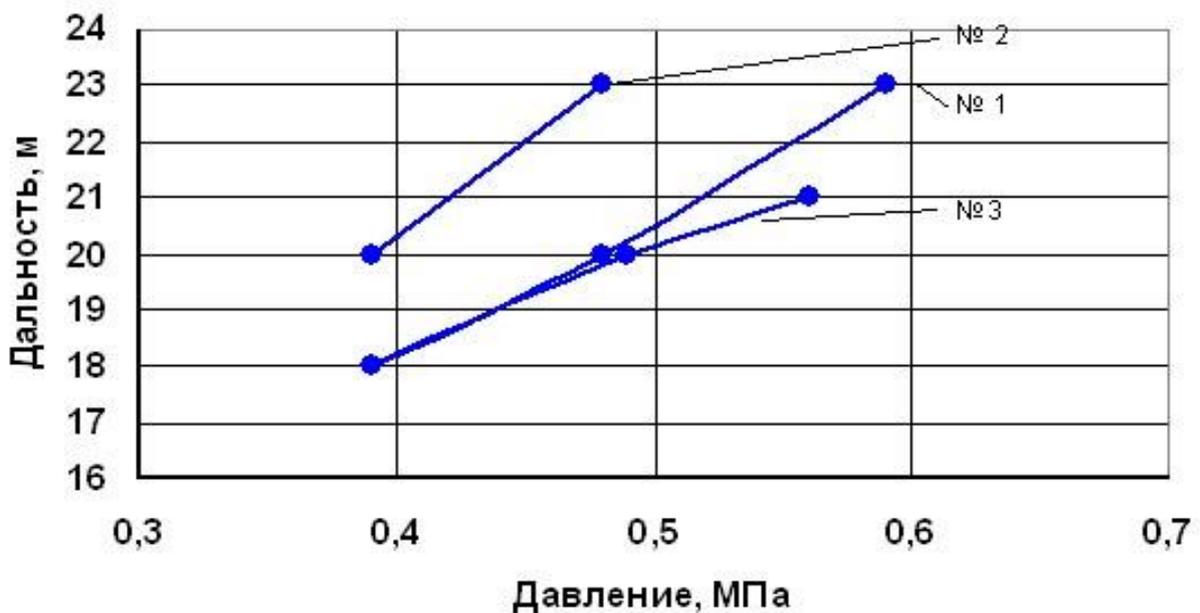


Рис. 5.28. Дальность струи в зависимости от давления

Результаты испытаний показали, что при уменьшении проходных сечений для воздушной струи и воды (вариант 1) улучшается дисперсность распыла. При этом уменьшается расход воды, дальность струи практически не изменяется. В варианте 2 при увеличении обоих сечений возрастает расход воды и ухудшается качество распыла, но возрастает дальность.

В варианте 3 при уменьшении проходного сечения для потока воды ухудшается качество распыла.

5.6. Двухфазный распылитель для систем управления экологической безопасностью

В двухфазных распылителях газовый поток с большой скоростью сталкивается с жидкостью снаружи или внутри корпуса распылителя. Поскольку величина энергии, затрачиваемой на распыливание, не зависит от количества жидкости, то размер капель не определяется расходом жидкости и хорошее качество распыливания может быть получено как при больших, так и малых расходах. При этом углы конуса распыла также могут быть различными и обеспечивают размер капель меньше 20 мкм [217, 218].

Размер капель, получаемый в двухфазных распылителях, может быть определен из эмпирической зависимости [216]

$$d_{\text{ср}} = \frac{585}{V} \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_L}} + 597 \left(\frac{\eta}{\sqrt{\gamma \rho_L}} \right)^{0,45} \left(\frac{1000}{j} \right)^{1,5}, \quad (5.1)$$

где V – скорость воздуха относительно жидкости, γ – динамическая вязкость, j – объемное соотношение воздуха и жидкости на выходе.

Это уравнение показывает, что средний размер капель определяется количеством воздуха, используемого на единицу жидкости, и их относительными скоростями. Таким образом, средний размер капель уменьшается при увеличении давления воздуха и отношения воздуха к жидкости. Для получения $d_{\text{ср}}$ равным 20 мкм, согласно уравнению потребуются скорости воздуха больше 215 м/с и весовое отношение воздуха к жидкости, превышающее 10 кг/кг. При таких больших соотношениях второе слагаемое уравнения мало, поэтому влияние вязкости незначительно. Однако возрастает влияние скорости воздуха.

В работах [217, 218] приведены результаты исследования двух типов небольших распылителей с соплами Вентури, причем один из них был с сужающимся, а другой — с сужающимся и затем расширяющимся соплом; в качестве исследуемой жидкости использовалась вода. Размер капель коррелировался в зависимости от отношения расхода воздуха к жидкости и от диаметра сопла для воздуха и жидкости. Отношение объемного расхода воздуха к жидкости составляло 3 – 5 кг/кг, а диаметр воздушного сопла изменяли от 3,18 до 6,27 мм. Наименьший размер капель при наиболее низком соотношении воздуха и жидкости получался на конфузно-диффузорном сопле с самым маленьким диаметром.

Распределение капель по размерам при распыливании двухфазными распылителями изменяется в зависимости от конструкции и размеров сопла.

Более низкие значения среднего размера капель получаются при отборе пробы вблизи распылителя, так как мелкие капли уносятся и при столкновении на некотором расстоянии соединяются, образуя капли большего среднего диаметра. На рис. 5.29 и в табл. 5.1 приведены примеры распределения капель при работе двухфазного распылителя на воде с вихревой головкой.

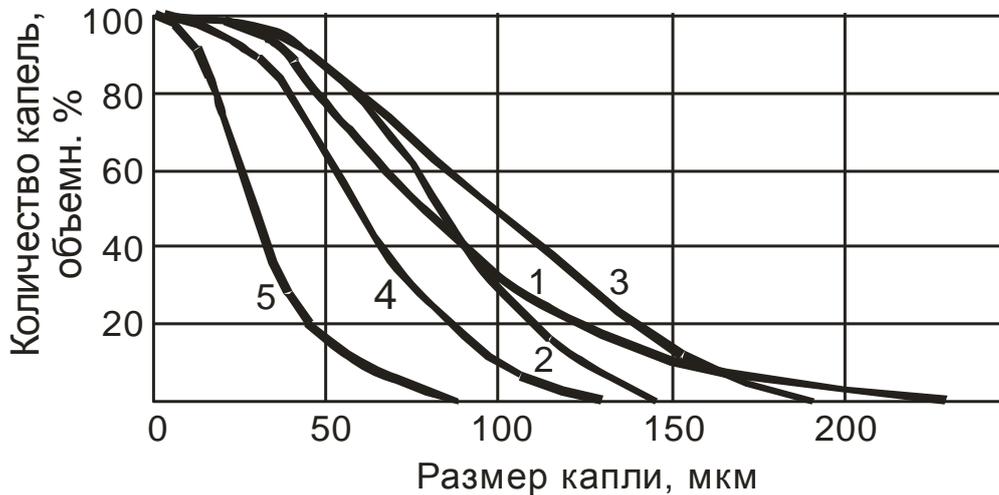


Рис. 5.29. Распределение капель по размерам

Таблица 5.1

Характеристика двухфазного распылителя

Номер кривой	Ширина щели для воздуха, мм	Давление, бар		Расход воды, л/ч	Соотношение воздуха и воды, кг/кг	Средний размер капли, мкм	Расстояние до места отбора пробы, мм
		Воздуха	Воды				
1	1,27	0,63	3,51	120,5	0,465	63	229
2	1,27	0,63	1,55	80,5	0,69	69	229
3	1,27	0,6	2,8	51,8	1,05	74,5	305
4	1,27	1,12	0,7	26,8	3,0	47	914
5	1,27	2,46	0,7	26,8	5,1	18	914

Характерные особенности потоков в соплах таких установок:

- многофазность: через канал текут газ и жидкость, причем жидкость может быть большей частью в капельном виде;
- массовая доля жидкости – более 10, объемная доля капель может составлять десятки процентов;
- параметры газа и жидкости несильно отличаются от нормальных условий и могут считаться идеальными жидкостями;
- нет интенсивного подвода или отвода тепла;

- поток динамически неравновесный, то есть на всем протяжении сопла скорости газа и жидкости могут существенно отличаться друг от друга.

Основная расчетная схема для определения режимных и геометрических параметров двухфазного сопла приведена на рис. 5.30.

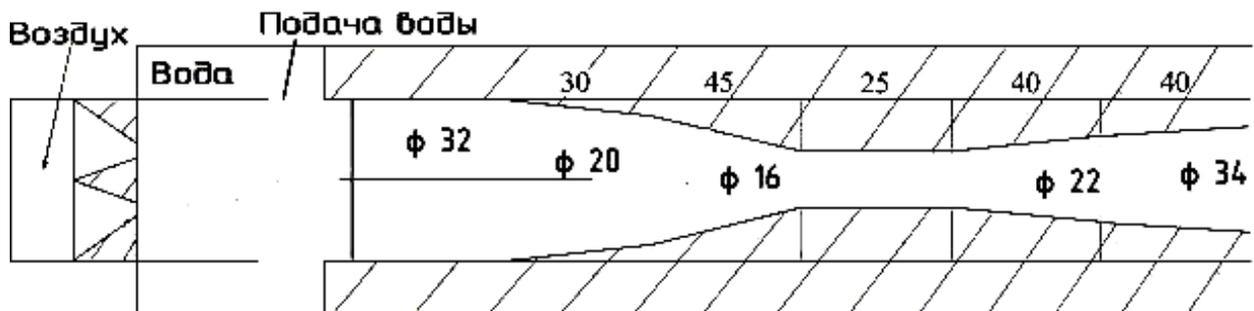


Рис. 5.30. Схема канала и способ подачи воды и воздуха в расчетном сопле для определения режимных параметров

Расчеты для данного сопла проводились при изменении давления воды от 0,5 до 7 бар.

На рис. 5.31 представлены результаты расчета.

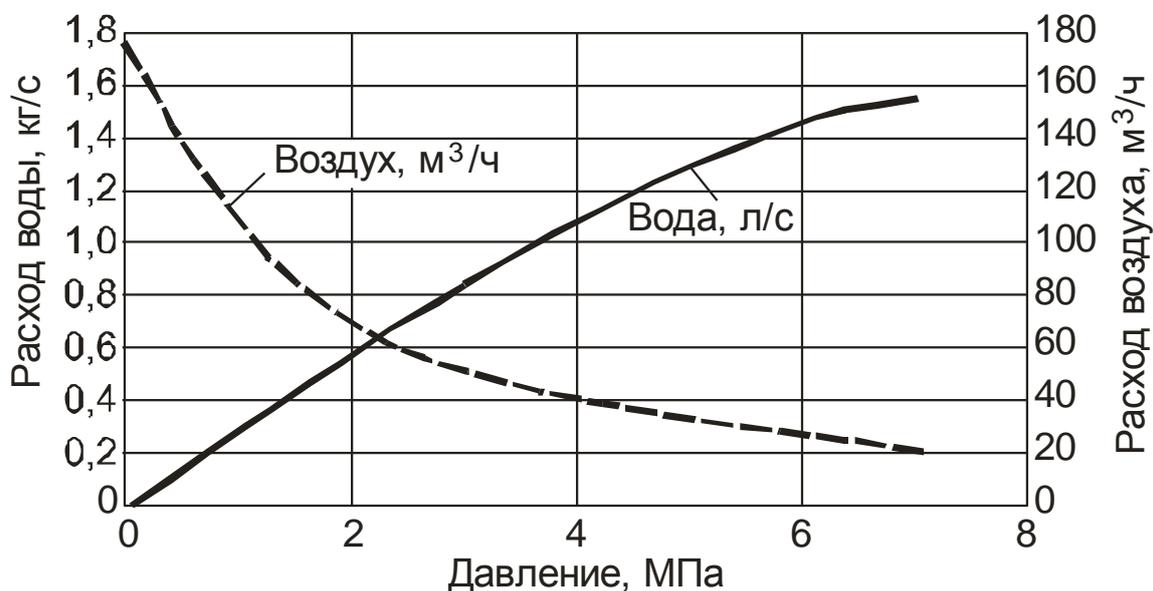


Рис. 5.31. Результаты расчета сопла при изменении давления воды

Разработка конструкции двухфазного распылителя. Разработано 2 варианта двухфазного распылителя. Конструктивные схемы их приведены на рис. 5.32 и 5.33.

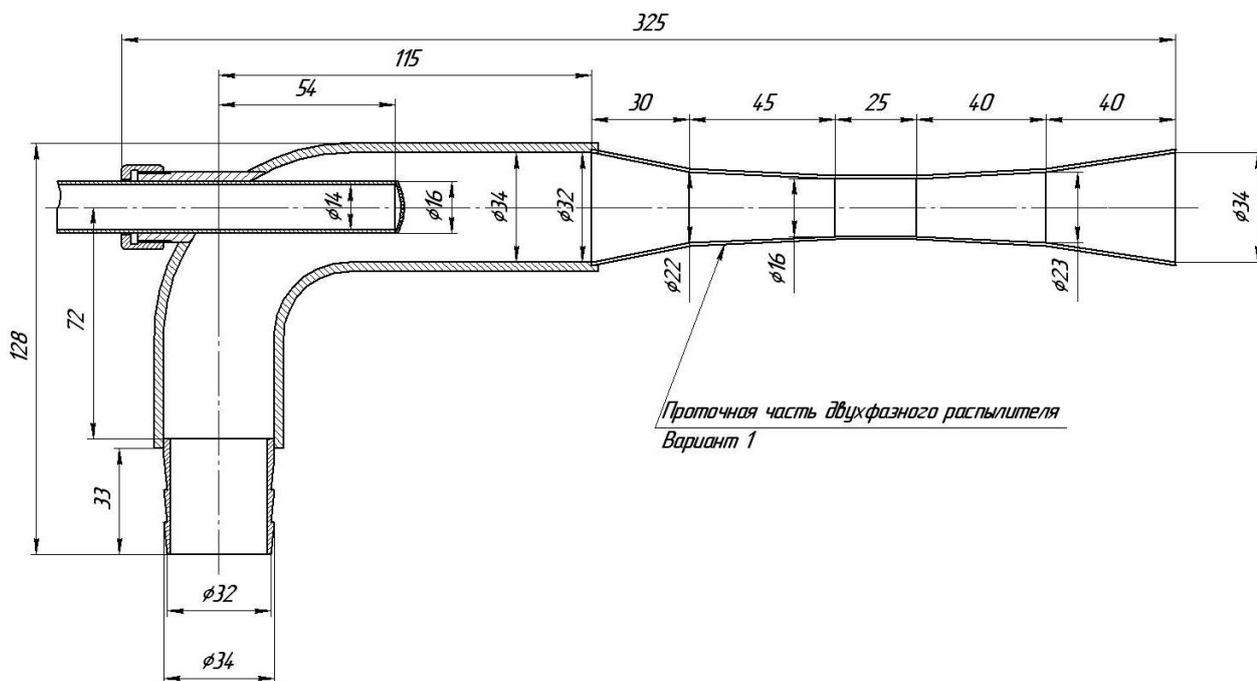


Рис. 5.32. Конструктивная схема двухфазного распылителя с проточной частью (вариант 1)

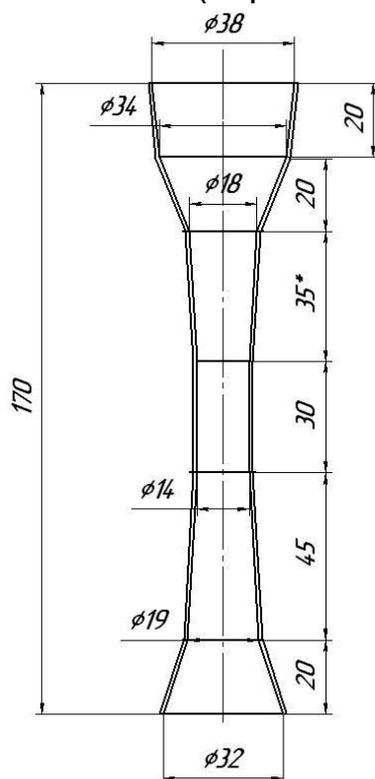


Рис. 5.33. Конструктивная схема проточной части двухфазного распылителя (вариант 2)

Вода подается через трубопровод диаметром 34 мм под давлением от 0,2 до 0,7 МПа. Через трубку диаметром 14 подается воздух от компрессора. Далее происходит смешение двух сред и формирование двухфазного потока в проточной части, образованной коническими и цилиндрическими частями.

скими поверхностями. Благодаря наличию потока воздуха с высоким давлением происходит аэродинамическое дробление капель и образование мелкодисперсной водовоздушной струи.

При разработке конструкции распылителя использовался большой опыт создания таких устройств в ХАИ [216, 217, 218]

Поскольку структура газок капельного потока сильно зависит от формы и размеров отдельных элементов проточной части, было изготовлено и испытано 2 варианта сопел с различными размерами (см. рис. 5.32, 5.33). Экспериментальные испытания позволили определить наиболее приемлемый вариант.

5.7. Некоторые характеристики двухфазных распылителей для систем управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур

Определены характеристики двухфазных распылителей с проточной частью, конструктивные схемы и размеры которых приведены на рис. 5.32 и 5.33. Эти результаты показаны на рис. 5.34.

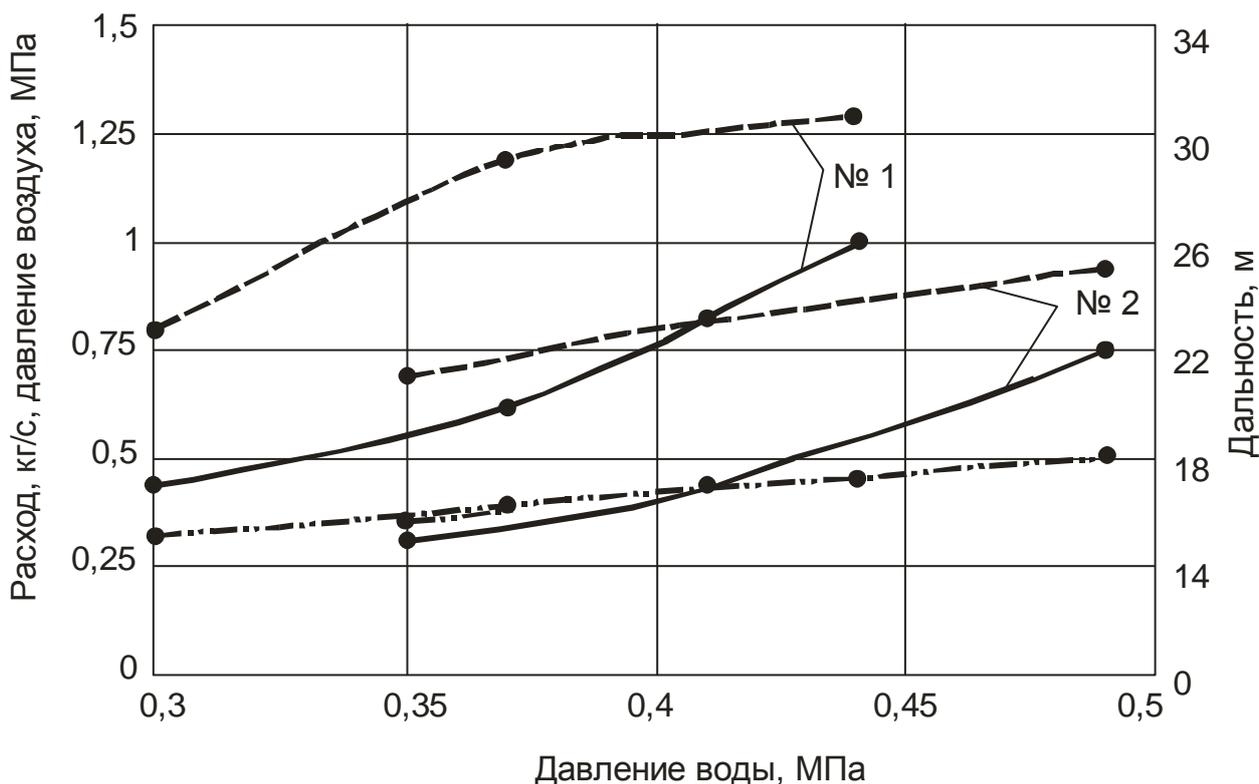


Рис. 5.34. Результаты испытаний двухфазных распылителей:

----- G , кг/с; - · - · - $P_{\text{воз}}$, МПа; — L , м

Испытания двух вариантов проточных частей двухфазных распылителей показали хорошие результаты. Тонкий распыл получается при большой дальности. При этом расход воды существенно уменьшается. Срав-

нение двух распылителей показывает, что распылитель, выполненный по первому варианту (см. рис. 5.32), имеет лучшие параметры, чем распылитель по второму варианту. Распылители такой конструкции рекомендуются для применения в системах управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур.

6. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ МНОГОФАЗНЫЕ ДИСПЕРСНЫЕ СТРУКТУРЫ

6.1. Метод прогнозирования последствий и модель автоматизированной системы управления экологической безопасностью опасного производства при возникновении аварийных ситуаций

При аварийных ситуациях, приводящих к возникновению экологической опасности, на опасных объектах могут реализоваться угрозы: распространения облака отравляющих веществ, образования зоны загазованности топливовоздушной смесью рабочего пространства; возникновения огненных шаров, взрыва и т.п. Основными обязанностями диспетчера в таких случаях являются оповещение определенных должностных лиц, служб, производственного персонала и координация действий с целью локализации масштабов аварии, минимизации потерь располагаемых ресурсов. Представленные угрозы реализуются обычно в течение малого времени с момента возникновения аварии. Диспетчер должен в сжатый срок и безошибочно организовать процесс работы предприятия в аварийной ситуации и осуществить уведомление должностных лиц, служб, производственного персонала о случившемся по телефонным линиям и локальной системе оповещения. При этом необходимо учитывать, что опасные процессы, характеризуемые зонами поражения, происходят в реальных масштабах пространства и времени, зависят от текущих погодных условий и масштабов аварии [147]. Доступные для анализа современные методы и технологии поддержки действий диспетчера в основном направлены на создание аппаратной поддержки ранней стадии обнаружения аварий [115] и систем оповещения [122]. Например, комплекс автоматизированных систем раннего выявления чрезвычайных ситуаций и оповещения, разрабатываемый предприятиями ООО ПНФ «Элон-ТТ» (г. Харьков), ООО НПП «Озон-С» (г. Днепро-петровск) и ООО «Оптим-Комплекс» (г. Запорожье), предназначен для реализации следующих операций: раннего выявления угрозы возникновения чрезвычайных ситуаций (контроль докритических параметров); выявления чрезвычайных ситуаций (контроль критических параметров); оповещения работающего персонала и других лиц, находящихся на территории ОАО «Запорожжкокс», об угрозе или возникновении чрезвычайных ситуаций,

руководящего состава, ответственных должностных лиц территориальных органов МЧС и гражданской защиты населения, органов исполнительной власти. Данный комплекс удовлетворяет требованиям приказа МЧС Украины № 288 и может быть базовым для поддержки действий диспетчера предприятия. Этот комплекс не решает задачи прогнозирования последствий аварии с учетом текущих реальных условий и возникающей при этом экологической опасности. К локальным системам оповещения, управляемым диспетчером, относятся такие системы, как комплекс централизованного оповещения «Певец» или комплекс централизованного оповещения «Заря» [122]. Данные системы выполняют только часть функций, возложенных на диспетчера и связанных с автоматическим оповещением. Основными недостатками этих систем являются невозможность динамического формирования таблиц оповещения и полное отсутствие поддержки действий диспетчера в прогнозировании и координации служб при ликвидации последствий аварии.

6.1.1. Постановка задачи и метод ее решения

Метод прогнозирования последствий и модель автоматизированной системы управления экологической безопасностью опасного производства при возникновении аварийных ситуаций базируются на рассмотрении сложной физической системы (СФС), включающей опасное производство, диспетчерскую службу, аппаратную систему контроля технического состояния производства как единой информационной структуры. Необходимо осуществить синтез рациональных решений, обеспечивающих управление имеющимися в распоряжении лиц, принимающих решения (ЛПР), ресурсами с целью, в случае возникновения аварии, локализации ее масштабов, минимизации потерь располагаемых ресурсов.

Математическая модель процесса принятия решений ЛПР при возникновении и развитии аварий на опасном производстве основана на последовательности преобразований хранящейся и поступающей информации. Эта модель представлена кортежем вида

$$D = \langle \vec{T}, \vec{P}, \vec{M}, \vec{E}, \vec{R} \rangle, \quad (6.1)$$

где \vec{T} – вектор параметров состояния средств технического обеспечения оповещения и определения погодных условий; \vec{P} – вектор параметров, определяющих расположение источников опасности в метрическом

пространстве; \vec{M} – вектор параметров, характеризующих масштабы и величины параметров аварийного процесса; \vec{E} – вектор текстовых семантических параметров, определяющих тип аварийного события; $\vec{R} = [R_d, R_s]^T$ – вектор величин параметров, характеризующих действия диспетчера R_d в различных ситуациях; список оповещения R_s , формируемый динамически на основе данных прогноза.

Пусть рассматриваемая СФС состоит из i подсистем, тогда для любой i -й подсистемы процесс принятия решений ЛПР определяется кортежем D_i .

Предполагается, что известны:

1) детерминированные модели физических процессов, которые могут возникать в i -й подсистеме при аварии:

$$f_{ij} : \vec{S}_{ij} \rightarrow \vec{\Phi}_{ij}, \quad (6.2)$$

где $j = 1 \dots J$ – набор элементарных событий); \vec{S}_{ij} – вектор переменных, определяющих начальное состояние i -й подсистемы; $\vec{\Phi}_{ij}$ – вектор фазовых переменных элементарных физических процессов, которые могут возникнуть в i -й подсистеме при чрезвычайной ситуации (ЧС);

2) состояние средств технического обеспечения оповещения и определения погодных условий, представленное вектором усредненных параметров \vec{T}_{ij} по времени усреднения Δt .

Для анализа и прогнозирования последствий техногенных аварий рассматривается комплексная модель чрезвычайной ситуации, включающая в себя:

1) имитационную модель (дискретно-событийную) развития аварии в форме «дерева процессов»

$$\mu_k : \{(S, \Phi, \vec{P}_k)_i, \vec{E}_k\} \rightarrow \vec{M}_{ki}, \quad (6.3)$$

где

$$S_i = \{\vec{S}_{ij}\}; \Phi_i = \{\vec{\Phi}_{ij}\}; \vec{M}_k = \sum_i \vec{M}_{ki};$$

2) детерминированные модели

$$f_{ij} : \vec{S}_{ij} \rightarrow \vec{\Phi}_{ij}, j = 1 \dots J. \quad (6.4)$$

Таким образом, необходимо в заданное время: провести ввод начальной информации; выполнить математическое моделирование неблагоприятных физических процессов; осуществить анализ полученных данных и выделить объекты, для которых прогнозируемые последствия превышают приемлемый уровень $\bar{M}_k > \bar{M}_{\text{прием}}$, где $\bar{M}_{\text{прием}}$ – вектор значений приемлемых последствий; определить значения вектора параметров \bar{R} , характеризующих реакцию СФС на воздействия; выполнить операции информационного обеспечения средств автооповещения. Предполагается, что в процессе работы производства в аварийной ситуации с помощью программных средств ведется мониторинг состояния СФС в реальном времени.

На основе анализа данных мониторинга СФС и разработанных ранее планов ликвидации аварийных ситуаций на производстве определяются источники опасности, создается электронная объектная карта предприятия и прилегающей местности в масштабе, соответствующем максимальной угрозе.

6.1.2. Модель автоматизированной системы управления экологической безопасности опасного производства при возникновении аварийных ситуаций

Для того, чтобы ускорить выполнение необходимых в случае возникновения аварии операций и минимизировать возможность ошибок, связанных с психологическими и субъективными особенностями ЛПР, а также получить в короткий срок объективный прогноз развития опасных событий, разработаны информационная технология и реализующий ее автоматизированный программно-аппаратный комплекс (АПАК) поддержки принятия решений диспетчера в аварийных ситуациях.

Программно-аппаратный комплекс состоит из следующих составляющих:

- программный модуль, содержащий средства моделирования неблагоприятных физических процессов и позволяющий проводить предварительный анализ и прогнозирование размеров областей и значений параметров поражающих факторов для указанных видов угроз;

- программный модуль, позволяющий формировать, дополнять и редактировать базу данных, содержащую информацию об источниках опасности, видах угроз, обслуживающем персонале, службах и объектах ответственности;

- аппаратная группа (рис. 6.1), включающая в себя комплекс датчиков, локальную сеть компьютеров, программное обеспечение для сбора, обработки и отображения информации, автоматическую цифровую метео-

станцию, локальную систему оповещения и АТС, управляемые цифровыми коммутируемыми средствами.



Рис. 6.1. Структурная схема автоматизированного программно-аппаратного комплекса поддержки принятия решений диспетчерской службы при возникновении и развитии аварий

На основании проведенного анализа средствами программного обеспечения формируется база данных (БД) (рис. 6.2). В таблицах БД указаны места расположения источников опасности. Далее осуществляется привязка аварийного участка к объектным картам, выполненным в реальном масштабе; задаются растровые и векторные карты для отображения; определяются виды угроз, реализация которых возможна при данном источнике опасности; вводятся данные, необходимые при выполнении математического моделирования и определения параметров для прогноза последствий аварии. В итоге формируются таблицы по обязательному

оповещению и действиям диспетчера в сложившейся аварийной ситуации.

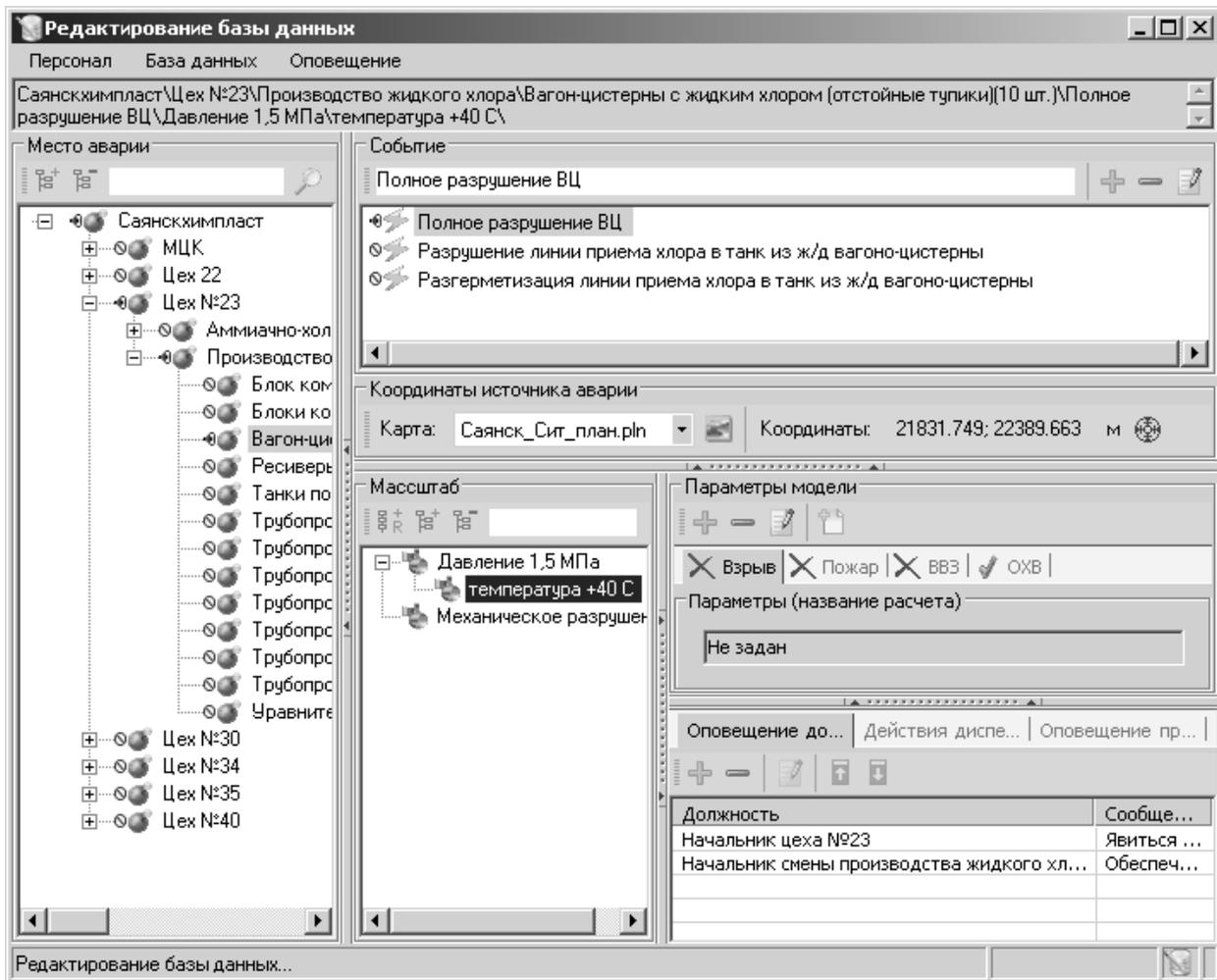


Рис. 6.2. База данных опасных объектов

Далее АПАК запрашивает текущие данные о ландшафтных погодных условиях, сформированные в течение заданного времени усреднения автоматической метеостанцией. Используя встроенные модели, АПАК выполняет расчет, генерирует и отображает графические и табличные результаты прогноза (рис. 6.3), генерирует списки обязательного и дополнительного (по объектам ответственности, попадающим в зону действия поражающих факторов) оповещения и подсказку действий диспетчера в данной ситуации.

Если в течение заданного времени АПАК не получит команду «отбой» оповещения по сгенерированным спискам, он автоматически выполняет

автодозвон по выделенным параллельным линиям АТС и каналам локальной системы оповещения.

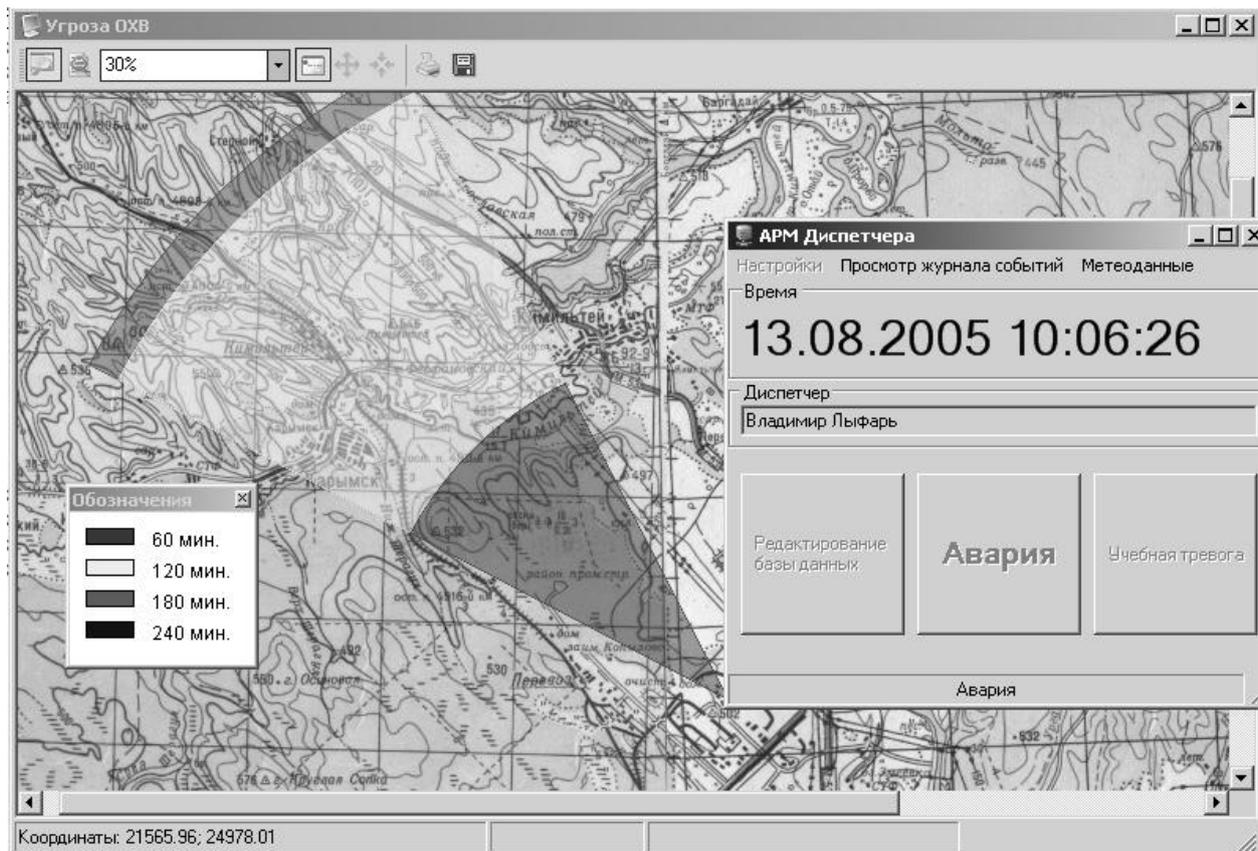


Рис. 6.3. Графическое отображение результатов прогноза

Графические данные прогноза отображают зоны воздействия опасных факторов во времени и пространстве для различных видов угроз, а также пути эвакуации. Табличные данные содержат сведения о значениях параметров аварии, объектах, находящихся в зоне опасности, расстояниях до источника опасности, времени начала воздействия на объекты, количестве людей на объектах и в зоне поражения и другие тактические данные.

Время от момента активизации процедуры «Авария» до получения прогноза и начала автоматического оповещения не превышает одной минуты. В течение всего времени, начиная с момента активизации процедуры «Авария» до момента окончания всех действий диспетчера, АПАК ведет логический журнал, фиксируя все события в реальном времени. На основании этого журнала проводятся исследования правильности действий диспетчера и оповещения в процессе аварии.

Важной частью АПАК поддержки принятия решений диспетчерской службы при возникновении и развитии аварий является достоверность и информационная полнота прогноза. Прогноз основан на использовании данных о реальном состоянии окружающей среды в момент возникновения аварии и имеющихся в распоряжении математических моделях не-

благоприятных физических процессов. Программный модуль, осуществляющий прогноз, позволяет получить сведения об опасных зонах, времени и степени угрозы для каждого объекта в прилегающем пространстве, количестве и местах нахождения людей, попадающих в зону поражения, заранее подготовленные данные о возможных путях эвакуации.

Прогноз проводится на основании непрерывно получаемых и обрабатываемых данных цифровой метеостанции. Обработка данных выполняется таким образом, чтобы используемые усредненные значения параметров ветра давали максимально достоверный прогноз времени ликвидации последствий аварии и эвакуации людей из опасных зон. При прогнозе учитывается возможность отклонения ветра от среднего направления [5].

Генерация таблиц оповещения осуществляется на основании сведений, внесенных в БД диспетчера, и логического вывода системы о степени «захвата» объектов ответственности зоной поражения. В случае бездействия диспетчера в течение настраиваемого времени или подтверждения диспетчером предложения системы о начале оповещения проводится параллельное адресное оповещение с контролем выполнения. Диспетчер получает подсказку действий на мониторе собственного компьютера и наблюдает процесс автооповещения по мере выполнения заданий таблиц оповещения. Выполняя задачи, поставленные перед ним в процессе локализации масштабов и ликвидации аварии, диспетчер отмечает на своем компьютере выполненные задачи. Система фиксирует эти действия в реальном времени и ведет полный отчет о событиях.

Данные прогноза дублируются на компьютере штаба ГО и ЧС предприятия. В случае уточнения прогнозируемых последствий диспетчер может повторить прогноз с учетом вновь определенных обстоятельств и измененных величин параметров. В этом случае система вновь генерирует таблицы оповещения, обновляет графические и табличные данные прогноза.

Диспетчер в процессе работы может в интерактивном режиме редактировать данные в БД, активизировать процедуры «Учебная тревога» или «Авария». В момент приема дежурства диспетчер запускает АПАК под управлением своего профиля и вводит пароль. АПАК идентифицирует ответственного и ведет журнал изменений в процессе дежурства по системному времени.

Процедура «Учебная тревога» отличается от процедуры «Авария» тем, что диспетчер на свое усмотрение может отключить оповещение или провести его с обязательной генерацией сообщения о том, что тревога учебная и проводится проверка модулей и аппаратной группы АПАК.

В процессе работы АПАК реализуется как интерактивный режим работы пользователя, так и режим автоматической проверки целостности данных и работоспособности средств комплекса. В случае сбоя или возникновения ошибок АПАК формирует текстовый отчет о проверке, в котором

указываются места локализации ошибок. АПАК содержит систему настроек и файлов обмена данными открытого формата, позволяющих адаптировать данную разработку к условиям различных диспетчерских пунктов, самостоятельно изменять настройки и данные в случае изменения технологии производства или системы оповещения, что обеспечивает гибкость принятия решений и расширяет возможности применения данной разработки.

6.2. Разработка и внедрение системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной степными или лесными пожарами

Для тушения лесного или степного пожара предлагается к использованию многофазная дисперсная структура в виде завесы, состоящей из мелкодисперсных частиц технологической жидкости. Она применяется совместно с линейным зарядом, выполненным в виде полиэтиленового рукава, заполненного горючим газом, например метаном.

Система гашения пожара в лесах, на открытой местности, в домах и тоннелях [328] заключается в том, что на месте пожара устанавливаются экраны в виде пластин, на верхнем крае которых расположена труба с подачей воды к ней, что позволяет противостоять распространению пламени. Также на месте пожара отсасывается кислород и нагнетается углекислый газ, который делает невозможным процесс горения из-за недостаточного количества окислителя. Недостатком этой системы гашения пожара является то, что процесс отсасывания кислорода и подачи углекислого газа требует габаритного оборудования и очень усложнен на открытом воздухе.

Нами предлагается система тушения лесных пожаров, суть которой заключается в том, что на месте пожара устанавливают экран в виде пластин с прорезанными в них окошками, которые на экране с обеих сторон создают защитную охлаждающую завесу в виде капельного экрана из насадок, которые смонтированы на верхней кромке экрана, а со стороны направления поступления теплового потока в предварительно вырытой траншее взрывают протяжный рукав с горючим газом. Преимуществом этой системы способа является то, что он позволяет избежать распространения лесного пожара путем ликвидации уже существующего возгорания сбиванием пламени с объекта горения, что является более эффективным в условиях открытого пространства.

Применение указанных признаков позволяет избежать распространения лесного пожара за счет экранирования его распространения и ликвидации уже существующего загорания путем сбивания пламени с объекта горения (листьев и ветвей из дерева). На рис. 6.4 приведена система га-

шения лесных пожаров, использующая в своем составе генератор создания мелкодисперсной многофазной структуры.

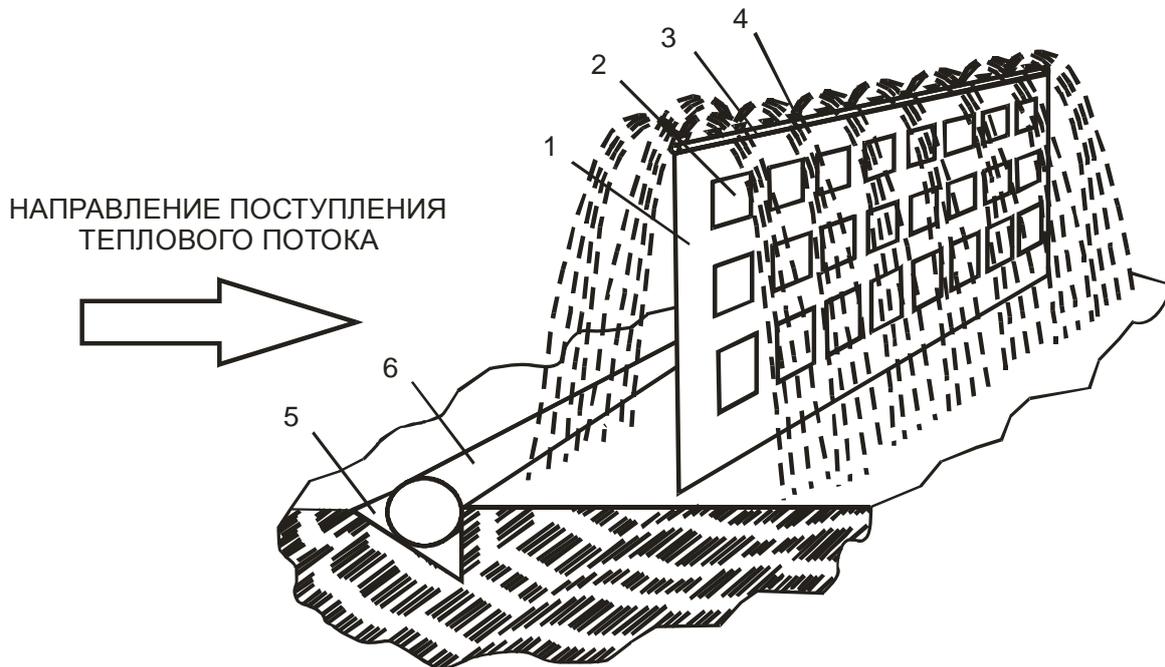


Рис. 6.4. Способ создания противопожарной завесы, использующей линейный заряд и многофазную дисперсную структуру в виде завесы

Система содержит экран в виде пластин 1, в которых прорезаны окошки 2. На верхней кромке экрана монтируется трубопровод 3 с сопловыми насадками 4. Из направления поступления теплового потока от лесного пожара предварительно отрывают траншею 5 несимметричного v-подобного профиля с перпендикулярной стенкой, расположенной к экрану, и наклонной стенкой, направленной в сторону поступления лесного пожара, где помещают протяжный полиэтиленовый рукав 6, который заполняют горючим газом.

Способ реализуется следующим образом. В местах, где расположены склады или жилые строения, по периметру этих застроек роют траншею v-образного несимметричного профиля, причем перпендикулярная стенка размещается ближе к застройке, а наклонная стенка – к возможному фронту массового пожара.

Система, управляющая работой сопловых насадок 4, приведена на рис. 6.5.

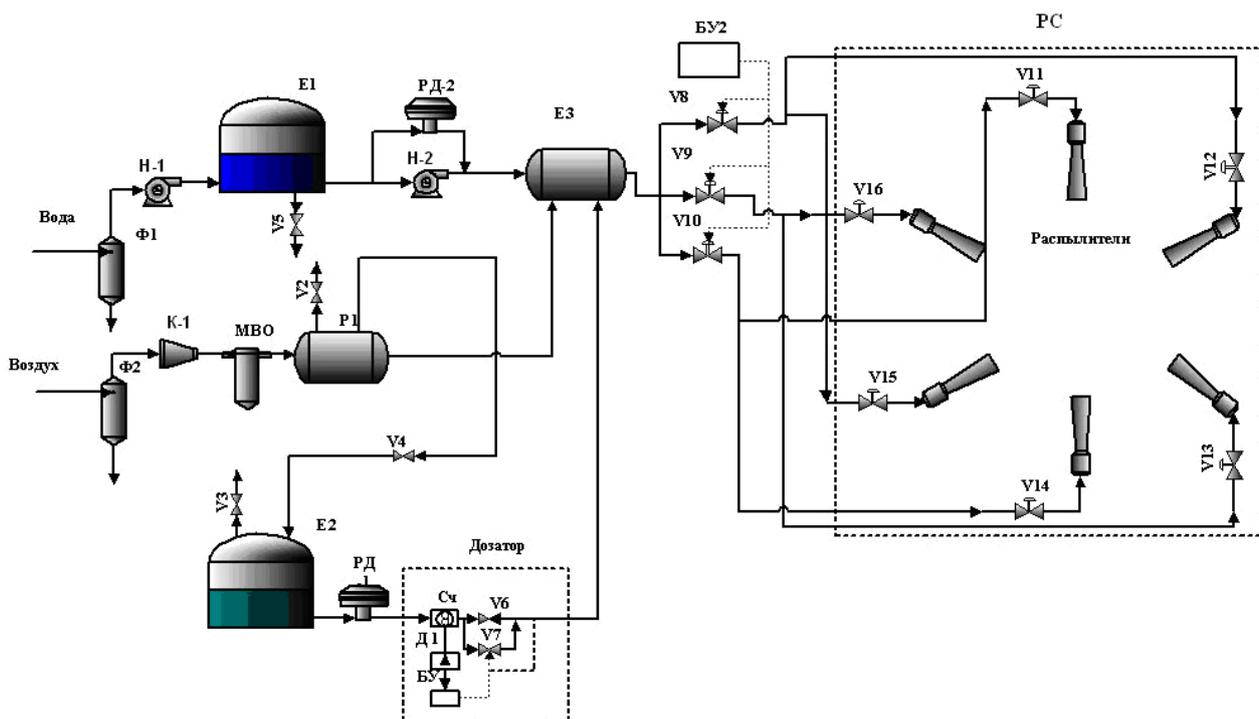


Рис. 6.5. Система управления сопловыми насадками для обеспечения экологической безопасности с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной степными или лесными пожарами: Ф1 – фильтр для воды; Ф2 – фильтр для воздуха; Н1 – насос подкачивающий; Н2 – насос питающий; Е1 – емкость для воды; Е2 – емкость для ПАВ; Е3 – емкость для раствора; РД1, РД2 – регулятор давления; К1 – компрессор; МВО – маслоотделитель; Р1 – ресивер; Сч – счетчик; Д1 – датчик; БУ – блок управления дозатором; БУ2 – блок управления распылителями; РС – распределительная система; v1...v16 – клапаны

6.3. Разработка и внедрение системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной взрывом метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт

При наличии опасности, вызванной взрывом метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных выработках угольных шахт, рекомендуется использовать многофазную дисперсную структуру в виде «пробки», формируемой мелкодисперсными частицами технологической жидкости (воды) в тоннеле.

Наиболее близким по технической сути к предлагаемому техническому решению является устройство для предупреждения пожаров и взрывов пожароопасной среды (патент России RU 2292927, кл. А 62 С 3/00, 2005 год), которое содержит размещенный на колесном шасси трубчатый корпус со входными отверстиями для подачи жидкости и выходными отверстиями для выброса жидкости в зону горения.

Недостатком этой установки является то, что распылительные устройства расположены на значительном расстоянии от стенок тоннеля, что не дает возможности перекрыть жидкостью, которая распыляется, всю площадь сечения выработки. Кроме того, это устройство создает препятствие для перемещения людей вдоль тоннеля.

Поставленная задача решается предлагаемым нами устройством, которое содержит размещенный на колесном шасси трубчатый корпус. Этот корпус выполнен по форме поперечного сечения тоннеля с возможностью расположения на расстоянии 0,2...0,3 м от стенок выработки. Последнее позволяет обеспечить беспрепятственное передвижение устройства вдоль тоннеля (на случай, когда геометрические параметры контура сечения неодинаковы вдоль тоннеля) и оборудовано форсунками для распыления жидкости, расположенными за периметром трубчатого корпуса и расположенными в вертикальной плоскости в направлении стенок выработки и к центру трубчатого корпуса. Также есть группа форсунок, которые расположены на трубчатом корпусе и направлены от корпуса в сторону горизонтальной плоскости выработки. Колесное шасси оборудовано откидными пандусами.

Применение их позволяет перекрыть технологической жидкостью, которая распыляется, всю площадь сечения выработки и повысить эффективность предупреждения пожаров и взрывов в шахтах и тоннелях, при этом устройство не создает препятствия для перемещения рабочих вдоль тоннеля.

На рис. 6.6, 6.7 приведены устройства для предупреждения пожаров и взрывов в шахтах и тоннелях, использующих для работы многофазные дисперсные структуры.

Устройство располагается в тоннеле выработки 1, содержит трубчатый корпус 2, колесное шасси 3 с колесами 4, форсунки 5, 6.

Принцип работы устройства сводится к следующему. Устройство размещают на расстоянии 5 – 10 м от места проведения работ в тоннеле выработки 1. Трубчатый корпус 2 выполняют таким образом, чтобы он повторял геометрическую форму поперечного сечения тоннеля выработки. Вода, которая подается к устройству, распыляется в вертикальной плоскости форсунками 5 в направлении стенок тоннеля, а форсунками 6 – к

центру трубчатого корпуса и создает водяную завесу, а течение воздуха в тоннеле превращает структуру «завеса» в структуру «пробка». Пылегазовая смесь проходит через завесу, орошается водой и осаждается, кроме того, она напитывается водой и создает пылегазовую смесь взрывобезопасной, что предотвращает возникновение пожара и взрыв.

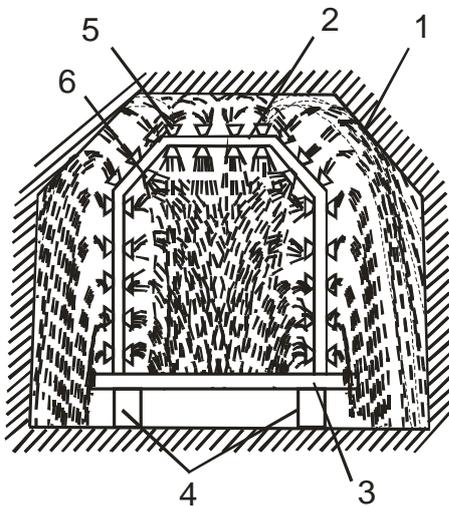


Рис. 6.6. Устройство для предупреждения взрывов и пожаров в горных выработках угольных шахт (вид устройства в сечении выработки)

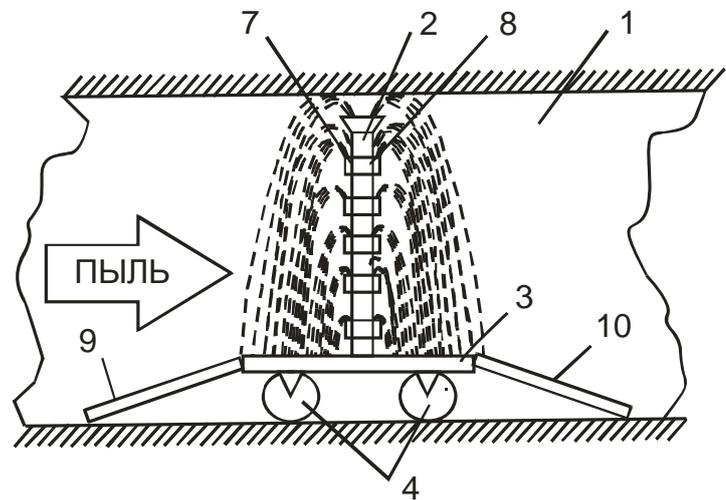


Рис. 6.7. Устройство для предупреждения взрывов и пожаров в горных выработках угольных шахт (вид устройства вдоль выработки)

Устройство, представленное на рис. 6.7, расположено в тоннеле выработки 1 и содержит трубчатый корпус 2, колесное шасси 3 с колесами 4, форсунки 7, 8 и пандусы 9, 10.

Откидные пандусы 9, 10 обеспечивают перемещение человека вдоль тоннеля через водяную пробку в случае возникновения чрезвычайной ситуации.

Применение устройства для предупреждения пожаров и взрывов в шахтах и тоннелях позволяет повысить эффективность предупреждения пожаров и взрывов в шахтах и тоннелях.

На рис. 6.8 приведена система управления распылителями, создающими многофазную дисперсную структуру в горных выработках.

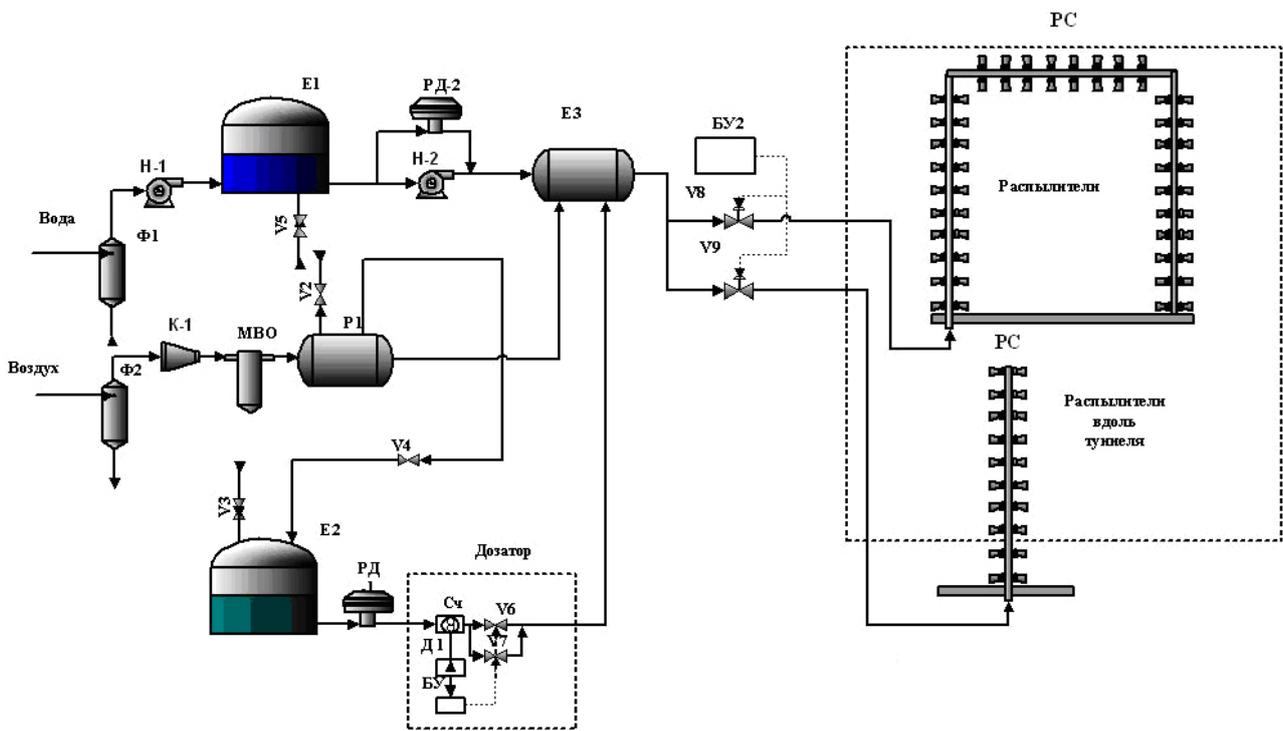


Рис. 6.8. Системы управления распылителями для обеспечения экологической безопасности с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной взрывом метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт: Ф1 – фильтр для воды; Ф2 – фильтр для воздуха; Н1 – насос подкачивающий; Н2 – насос питающий; Е1 – емкость для воды; Е2 – емкость для ПАВ; Е3 – емкость для раствора; РД1, РД2 – регулятор давления; К1 – компрессор; МВО – маслоотделитель; Р1 – ресивер; Сч – счетчик; Д1 – датчик; БУ – блок управления дозатором; БУ2 – блок управления распылителем; РС – распределительная система; v1...v9 – клапан

6.4. Разработка и внедрение системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной запылением воздушной среды

Как отмечалось выше, оптимальным путем решения проблемы обеспечения экологической безопасности в процессе погрузки, разгрузки и транспортировки сыпучих материалов в портах с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной запылением воздушной среды, является использование атомайзеров или оросительных систем пылеподавления.

Для обеспечения выгрузки угля из полувагона и перегрузки его на склад рекомендуется применять два типа разработанных нами технологий орошения и реализующих их устройств:

1. При заборе угля грейфером из полувагона (рис. 6.9) необходимо применять веерную защиту (рис. 6.10) воздушной среды от мелкодисперсных частиц угля, которая реализуется установкой распылителя веерного типа на торец вагона. При этом над вагоном образовывается водяная защита (рис. 6.11), препятствующая поступлению мелкодисперсной фракции угольной пыли в атмосферу.



Рис. 6.9. Выгрузка угля из вагона без применения системы пылеподавления

2. При погрузке угля на склад и перегрузке угля на судно рекомендуется применение лафетных распылителей, которые монтируют на подпорные стенки склада в зоне проведения работ (рис. 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16).



Рис. 6.10. Распылитель веерного типа



Рис. 6.11. Структура водяной защиты веерного типа

Питание распылителей водой осуществляют от напорных трубопроводов, расположенных по периметру склада с возможностью забора воды из напорного трубопровода через определенное расстояние.

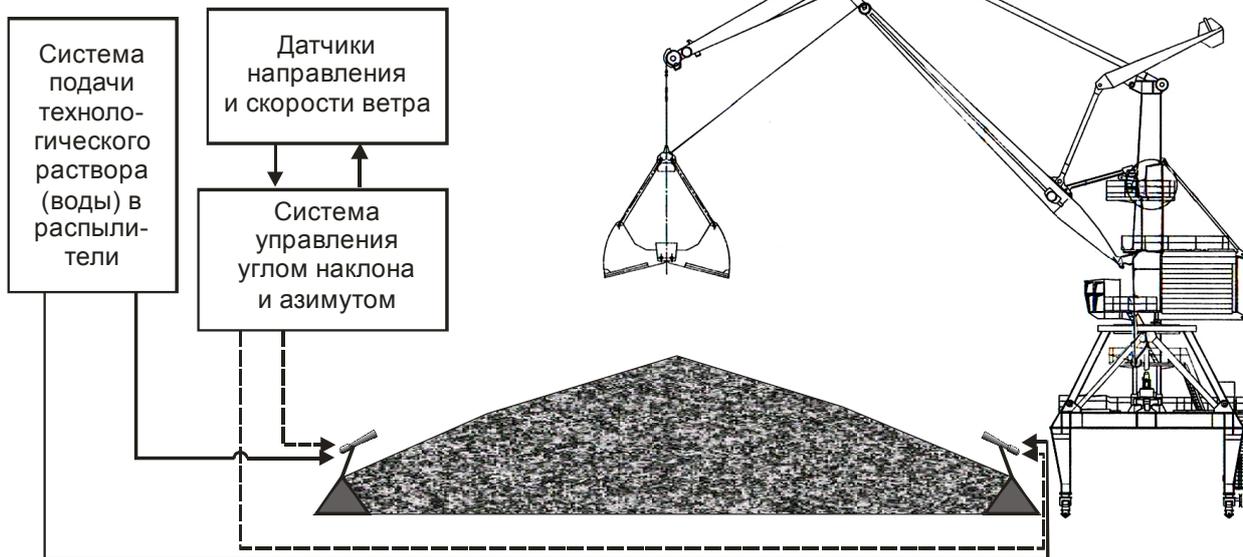


Рис. 6.12. Система управления экологической безопасностью в ГП «Мариупольский морской торговый порт»

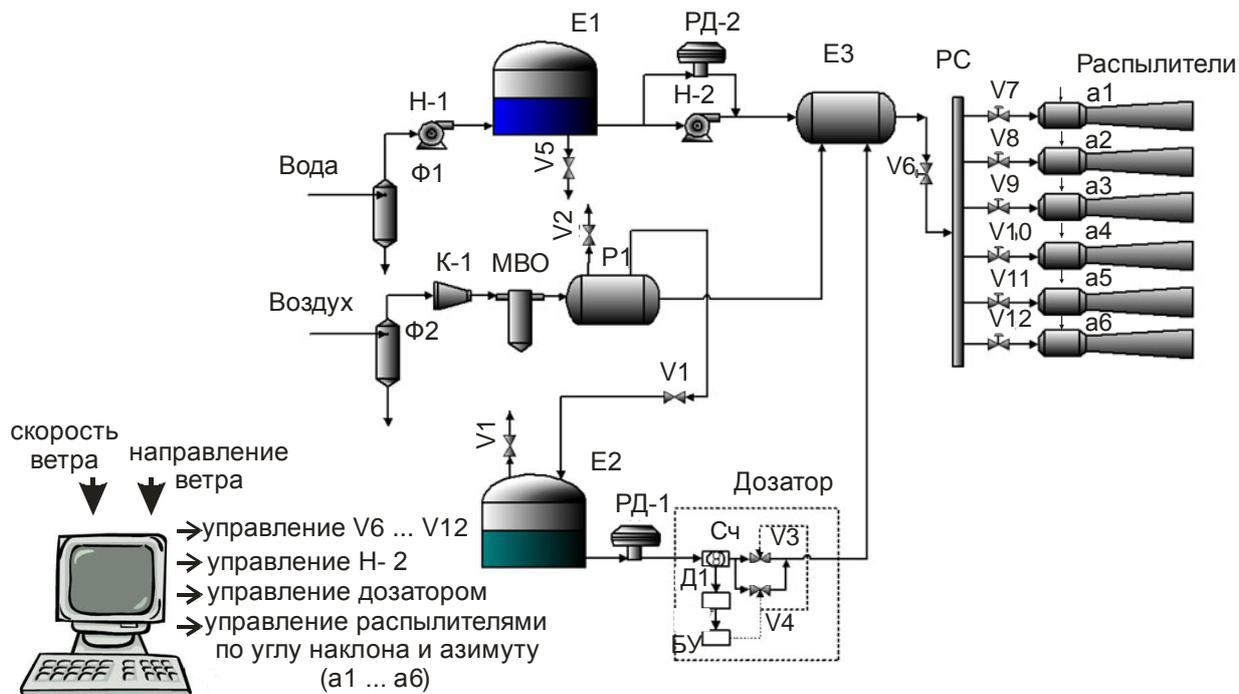


Рис 6.13. Схема системы управления экологической безопасностью в ГП «Мариупольский морской торговый порт»: Ф1 – фильтр для воды; Ф2 – фильтр для воздуха; Н-1 – насос подкачивающий; Н-2 – насос питательный; Е1 – емкость для воды; Е2 – емкость для ПАВ; Е3 - емкость для растворов; РД1, РД2 – регуляторы давления; К-1 – компрессор; МВО – масловоглототделитель; Р1 – ресивер; Сч – счетчик; Д1 – датчик; БУ – блок управления; РС – распределительная система; V1...V12 – клапаны; a1...a6 – управляющие усилия по углу наклона и азимуту

Давление воды в сети составляет 0,4...0,6 МПа. Подвод воды непосредственно к лафетным распылителям осуществляют с помощью гибких трубопроводов.

Легкосъемные лафеты монтируют на подпорной стенке. Управление углами поворота и наклона распылителя осуществляет оператор в ручном режиме.

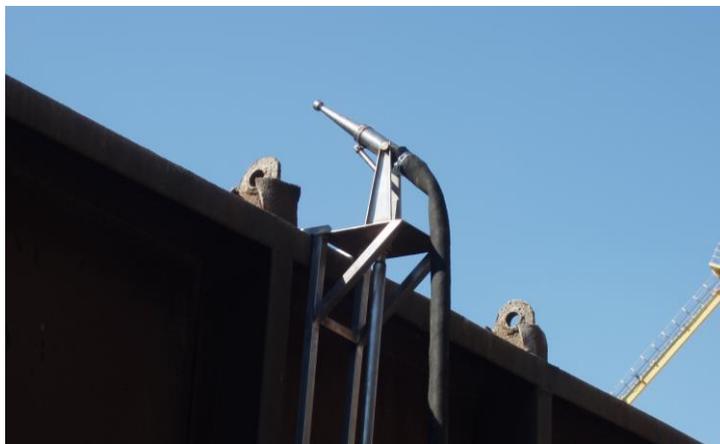


Рис. 6.13. Крепление лафета с распылителем на подпорной стенке склада



Рис. 6.16. Испытание группы лафетных распылителей в процессе погрузки угля

Система орошения с помощью двухфазных распылителей требует наличия источника сжатого воздуха. В процессе испытаний такой системы в ГП «Мариупольский морской торговый порт» ее подключение осуществлялось с запитыванием системы водой от переносной насосной станции и воздухом – от воздушного компрессора (рис. 6.17). Поэтому для внедрения в морском порту такой системы параллельно с водной магистралью монтируют воздушную магистраль. Подвод воздуха к распылителю осуществляют с помощью гибких шлангов высокого давления.

При создании водяной завесы, препятствующей распространению мелкодисперсных угольных частиц с помощью атомайзера, последний устанавливают на подпорной стенке на расстоянии 20...30 м от зоны погрузки (желательно с подветренной стороны). Питание атомайзера водой осуществляют от напорной водяной магистрали. Запитывание электродвигателя атомайзера производят от электросети переменного тока, рассчитанной на подключение нагрузки мощностью 10 кВт.

Для оперативного подавления мелкодисперсных угольных частиц может быть использована система, монтированная на автомобиле (рис. 6.18). Мобильная система содержит бак с водой емкостью 3 м³, вода из которой с помощью насосного агрегата подается под давлением 0,6 МПа на распылитель. Последний с помощью системы управления имеет возможность изменять направление подачи водяной струи по азимуту и тангажу. Для возможности применения двухфазных распылителей на автомобиле монтируют воздушные баллоны. Кроме того, для создания мелкодисперсной водяной завесы на автомобиле монтирован атомайзер.

Управление азимутом и тангажом атомайзера осуществляет оператор в ручном режиме.

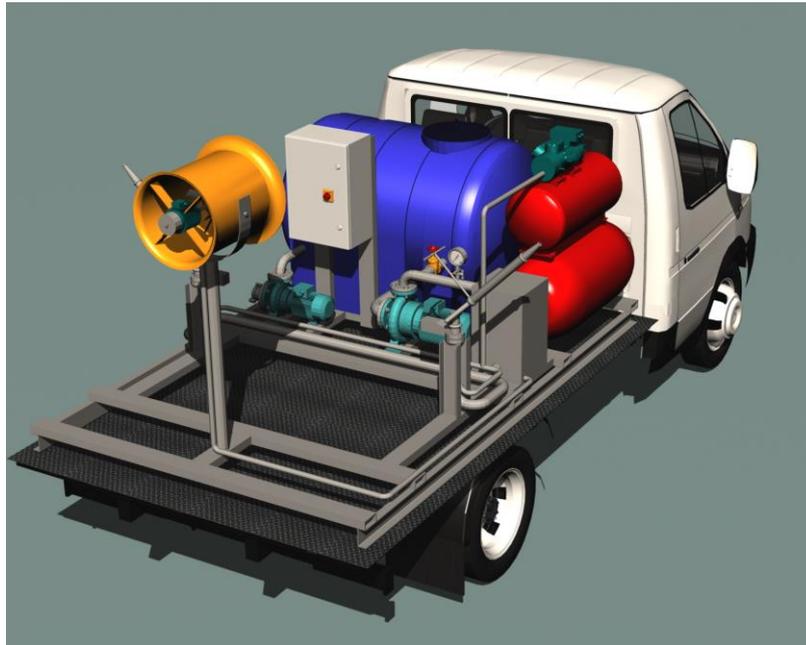


Рис. 6.18. Мобильная система пылеподавления (проект)

Система управления экологической безопасностью, подобная по исполнению схеме (см. рис. 6.14) погрузки угля грейферным механизмом, может быть установлена и при погрузке угля с помощью реклаймера (рис. 6.19).

Экспериментальные исследования, проведенные в ГП «Мариупольский морской торговый порт», показали, что концентрация пыли на площадке погрузки угля порталным краном снизилась в 4,64 раза и составила $8,23 \text{ мг/м}^3$, что свидетельствует о действенности метода обеспечения экологически безопасного уровня загрязнения атмосферного воздуха при погрузке и разгрузке сыпучих материалов.

Анализ полученных результатов гранулометрического состава угольной пыли (рис. 6.20) говорит о том, что при применении разработанной системы пылеподавления не только снижается концентрация пыли в рабочей зоне, но и уменьшается число мелкодисперсных частиц. Так, число мелкодисперсных частиц на исследуемых микрофотографиях диаметром $2...10 \text{ мкм}$ снизилось с 959 до 354 шт., то есть в 2,7 раза, а частиц диаметром $10...20 \text{ мкм}$ – с 615 до 240 шт., то есть в 2,5 раза. Результаты свидетельствуют о том, что мелкодисперсным орошением можно эффективно убирать из пыли угольные частицы, способные витать ($2...10 \text{ мкм}$). При этом число частиц более крупных фракций (50 мкм и более) осталось примерно таким же, как и до применения брандспойтной системы пылеподавления.

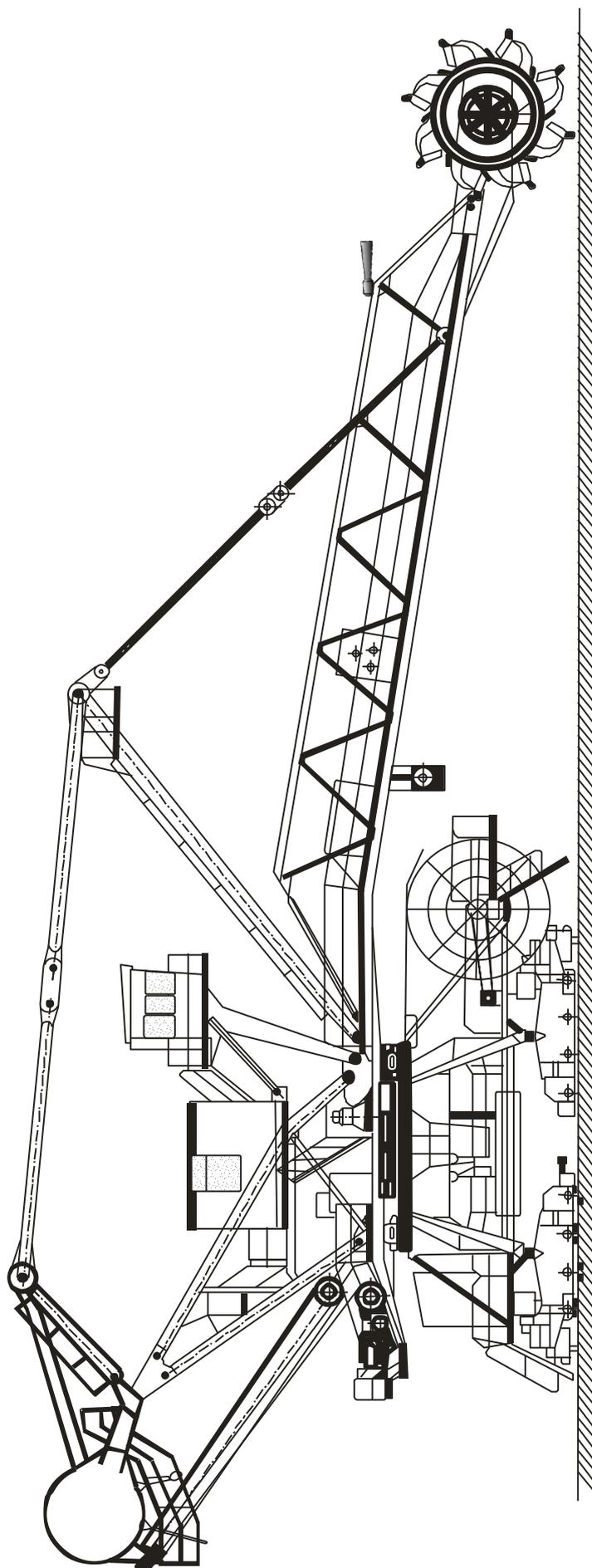


Рис. 6.19. Система управления экологической безопасностью при погрузке угля рекаймером

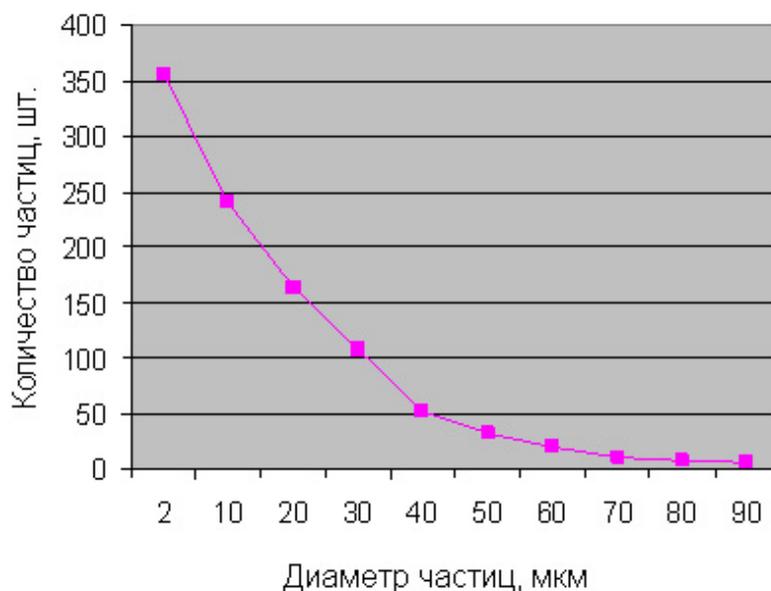


Рис. 6.20. Гранулометрический состав пыли при использовании в процессе погрузки угля брендспойтной системы пылеподавления

Таким образом, в данном разделе рассмотрены метод прогнозирования экологических последствий и модель автоматизированной системы поддержки действий диспетчера при возникновении аварийных ситуаций. Разработан реализующий представленную технологию автоматизированный программно-аппаратный комплекс. Использование автоматизированного программно-аппаратного комплекса даст возможность работникам диспетчерских пунктов и служб ГО и ЧС в интерактивном режиме осуществлять текущий контроль технического состояния опасных производств, а также автоматизировать процесс принятия решений в случае возникновения аварий с целью локализации их масштабов, минимизации потерь располагаемых ресурсов.

Определено, что рациональным путем решения проблемы обеспечения экологической безопасности при наличии опасностей, вызванных степными или лесными пожарами, взрывами метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт или опасности, вызванной запылением воздушной среды, является использование предложенных технологий и устройств, использующих многофазные дисперсные структуры.

При применении предлагаемой системы пылеподавления концентрация пыли на площадке работы порталного крана снизилась в 4,64 раза, что говорит о действенности внедренного метода обеспечения экологически безопасного уровня загрязнения атмосферного воздуха при погрузке и разгрузке сыпучих материалов. Применение разработанной системы пылеподавления уменьшает количество мелкодисперсных частиц в пыли, так число мелкодисперсных частиц на исследуемых микрофотографиях диаметром 2...10 мкм снизилось в 2,7 раза, а частиц диаметром 10...20 мкм - в 2,5 раза. При этом число частиц более крупных фракций (50 мкм и более) осталось примерно таким же, как и до применения брендспойтной системы пылеподавления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов, А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. [Текст] : учебник для вузов / А.А. Абрамов. – М. : Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2001. – Т. 1: Обогащительные процессы и аппараты. – 472 с.
2. Абрамов, Ю.А. Математическая модель двухфазной турбулентной струи [Текст] / Ю.А. Абрамов, В.Г. Селиванов, И.Н. Грицына // Проблемы пожарной безопасности : сб. науч. тр. НУЦЗУ. – Вып. № 2. – Х., 1997. – С. 138 – 141.
3. Абрамов, Ю.А. Математическая модель рабочих процессов в пожарных стволах с газожидкостными соплами [Текст] / Ю.А. Абрамов, В.Г. Селиванов, И.Н. Грицына // Пожежна безпека: матеріали III наук.-практ. конф. – К., 1997. – С. 288.
4. Абрамович, Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов [Текст] / Г.Н. Абрамович. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 287 с.
5. Аверкова, О.А. Комплекс компьютерных программ для расчета пылевоздушных течений в системах аспирации [Текст] / Н.М. Анжеуров, О.А. Аверкова // Новые огнеупоры. – 2008.– № 5.– С. 53 – 58.
6. Айруни, А.Т. Борьба с пылью на угольных шахтах за рубежом: Обзор [Текст] / А.Т. Айруни, Е.И. Слепцов. – М. : ЦНИЭИуголь. – Сер. Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1978. – 48 с.
7. Айруни, А.Т. Исследование структуры выбросоопасных углей Донбасса [Текст] / А.Т. Айруни, И.В. Зверев, М.О. Долгова // Прогноз и предотвращение газопроявлений при подземной разработке полезных ископаемых : сб. ст. – М. : ИПКОН АН СССР. – 1962. – С. 104 – 112.
8. Айруни, А.Т. Особенности микроструктуры и сорбционных свойств углей по отношению к различным газам [Текст] / А.Т. Айруни, В.А. Бобин, Б.М. Зимаков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения РАН, 1989.– № 1. – С. 67.
9. Айруни, А.Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах [Текст] / А.Т. Айруни. – М. : Наука, 1987. – 310 с.
10. Актуальные проблемы гражданской защиты [Текст] // Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций : материалы 11-й Междунар. науч. -практ. конф. МЧС России. – Н. Новгород : Вектор-ТиС. – 2006. – 386 с.
11. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен [Текст] : в 2 т. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М. : Мир, 1990. – Т. 1. – 384 с.

12. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен [Текст] : в 2 т. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М. : Мир, 1990. – Т. 2. – 726 с.
13. Аржаников, Н.С. Аэродинамика больших скоростей [Текст] / Н.С. Аржаников, Г.С. Садекова. – М. : Высш. шк., 1965. – 179 с.
14. Аэрогазодинамика выемочного участка [Текст] / Ф.А. Абрамов, Б.Е. Грецингер. – М. : Наук. думка, 1972. – 231 с.
15. Баум, Ф.А. Физика взрыва [Текст] / Ф.А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. – 800 с.
16. Бахитова, Р.Х. Рациональное природопользование: управление, безопасность и риски [Текст] / Р.Х. Бахитова // Проблемы экономики и управления. – М., 2004. – № 1 – 2. – С. 228 – 247.
17. Безуглая, Э.Ю. Чем дышит промышленный город [Текст] / Э.Ю. Безуглая, Г.П. Расторгуева, И.В.Смирнова. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 256 с.
18. Белов, И.А. Модели турбулентности [Текст] / И.А. Белов – Л. : ЛМИ, 1982. – 88 с.
19. Белоногов, И.П. Исследование пылевыведения и совершенствование способов и средств борьбы с пылью на основе водовоздушных эжекторов при работе проходческих комбайнов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Белоногов Игорь Павлович; ВостНИИ. – Кемерово, 1978. – 23 с.
20. Белоцерковский, О.М. Динамика пространственных вихревых течений в неоднородной атмосфере. Вычислительный эксперимент [Текст] / О.М. Белоцерковский, С.А. Андрущенко, Ю.Д. Шевелев – М. : Янус-К, 2000. – 456 с.
21. Белоцерковский, О.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент [Текст] / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. – М. : Наука, 1982. – 392 с.
22. Белоцерковский, О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред [Текст] / О.М. Белоцерковский. – М. : Наука, 1984. – 520 с.
23. Белоцерковский, О.М. Численный эксперимент в турбулентности. От порядка к хаосу [Текст] / О.М. Белоцерковский, А.М. Опарин. – М. : Наука, 2000. – 223 с.
24. Берлянд, М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы [Текст] / М.Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
25. Берлянд, М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы [Текст] / М.Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
26. Биченок, М.М. Проблеми природно-техногенної безпеки в Україні [Текст] / М.М. Биченок, О.М. Трофімчук. – К. : УІНСіР, 2002. – 268 с.
27. Білявський, Г.О. Основи екологічних знань [Текст] / Г.О. Білявський. – К. : Либідь, 1997. – 286 с.
28. Боков, В.А. Основы экологической безопасности [Текст]: учеб. пособие / В.А. Боков, А.В. Лущик. – Симф. : СОНАТ, 1998. – 224 с.

29. Борисов, А.А. О моделировании волн давления, образующихся при детонации и горении газовых смесей [Текст] / А.А. Борисов Б.Е. Гельфанд, С.А. Цыганов // Физика горения и взрыва. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1985.– Т. 21, № 2. – С. 90 – 97.
30. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах [Текст] / Б.Д. Бекирбаев, Г.С. Гродель, П.А. Гульшин и др. – М. : Госгортехиздат, 1959. – 499 с.
31. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах [Текст] / П.М. Петрухин, Г.С. Гродель, Н.И. Жиляев и др. – М. : Недра, 1981. – 271 с.
32. Борьба с угольной пылью в высокопроизводительных забоях [Текст] / И.Г. Ищук, Г.С. Забурдяев, В.П. Журавлев и др. – М. : Наука, 1975. – 115 с.
33. Бот, Р. Проветривание и пылеподавление на основных и вспомогательных процессах при подземной разработке полезных ископаемых [Текст] / Р. Бот, Р. Шульце // Глюкауф. – 1994. – № 2. – С. 33 – 37.
34. Брушлинский, Н.Н. Моделирование пожаров и взрывов [Текст] / под общ. ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М. : Пожнаука, 2000. – 482 с.
35. Брэдшоу, П. Введение в турбулентность и её измерение [Текст] / П. Брэдшоу. – М. : Мир, 1974. – 278 с.
36. Бугаенко, О.М. Особенности формирования математической модели двухфазной дисперсной смеси [Текст] / О.М. Бугаенко, А.В. Скларов // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ'2004: тез. доп. Міжнар. наук.-техн. конф. – Х., 2004. – С. 85.
37. Буравльов, Є. П. Підхід до оцінки збитків техногенних аварій [Текст] / В.О. Руденко, О.В. Губенко // Екологія і ресурси : зб. наук. праць Інституту проблем національної безпеки. – Вип. 16. – К. : 2006.– С. 112 – 121.
38. Бурчаков, А.С. Предварительное увлажнение угольных пластов и породных массивов [Текст] / А.С. Бурчаков, Г.Е. Панов. – М. : Недра, 1975. – 288 с.
39. Бурчаков, А.С. Динамика аэрозолей в горных выработках [Текст] / А.С. Бурчаков, Э.М. Москаленко. – М. : Наука, 1965. – 68 с.
40. Быков, А.М. Способы борьбы с пылью в шахтах при работе комбайнов [Текст] / Л.Я. Лихачев, Е.И. Онтин, И.П. Петров. – М. : Недра, 1968. – С. 3 – 16.
41. Вамболь, С.А. Анализ эффективности защитных мероприятий от воздействия избыточного давления ударной волны [Текст] / С.А. Вамболь, М.Л. Угрюмов // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали X міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2011. – С. 3.
42. Вамболь, С.А. Информационная технология поддержки принятия решений диспетчера в аварийных ситуациях [Текст] / С.А. Вамболь, М.Л. Угрюмов, В.А. Лыфарь // Можливості використання методів механіки

для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали ІХ міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2010. – С. 43.

43. Вамболь, С.А. Исследование численным методом процесса постановки дисперсной водяной завесы в системах управления экологической безопасности / С.А. Вамболь // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення : зб. наук. ст. у 2 т. – Т. 2 / УкрНДІЕП. – Х. : Райдер, 2012. – С. 154 – 159.

44. Вамболь, С.А. Математическое моделирование взрыва метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт [Текст] / С.А. Вамболь, Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. праць НУЦЗУ. – Вип. 15. – Х., 2012. – С. 31 – 40.

45. Вамболь, С.А. Математическое моделирование дисперсной фазы процесса установки водных завес в системах управления экологической безопасности [Текст] / С.А. Вамболь // Науковий журнал «Екологічна безпека» : Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2012. – Вип. 2/2012 (14). – С. 73 – 76.

46. Вамболь, С.А. Моделирование газовой фазы процесса установки дисперсных водных завес в системах управления экологической безопасности [Текст] / С.А. Вамболь // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського : зб. наук. праць – № 6/2012 (77). – Кременчук : КрНУ, 2012 – С. 91 – 93.

47. Вамболь, С.А. Моделі прогнозування значень основних параметрів зони можливого ураження внаслідок впливу «теплого випромінювання» [Текст] / С.О. Вамболь, Л.Б. Яковлев, В.Л. Клеєвська // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали ІХ міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2010. – С. 42.

48. Вамболь, С.А. Обеспечение экологической безопасности при утилизации РДТТ [Текст] / С.А. Вамболь, Н.В. Нечипорук, В.В. Вамболь // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали VI міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2007. – С. 27 – 28.

49. Вамболь, С.А. Оценка влияния защитных устройств на интенсивность ударной волны при взрыве газозвушной смеси [Текст] / С.А. Вамболь, М.Л. Угрюмов, Ю.А.Скоб // Пожежна безпека : матеріали Х Міжнар. наук.-практ. конф. – Х., 2011. – С. 232.

50. Вамболь, С.А. Разработка и испытания двухфазного распылителя с принудительной подачей воздуха для пылеподавления [Текст] / С.А. Вамболь, А.М. Ляшенко, Н.В. Кобрина // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. Н.Е. Жуковського «Харьк. авіац. ін-т». – 2011. – С. 82.

51. Вамболь, С.А. Расчет и испытания двухфазного распылителя с принудительной подачей воздуха [Текст] / С.А. Вамболь, Д.Н. Макаренко, В.Ш. Эрсмамбетов // Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства : ма-

теріали Всеукр. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів – Кременчук, 2010. – С. 182 – 183.

52. Вамболь, С.О. Прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій, спричинених пожежами, із застосуванням інформаційних технологій [Текст] / С.О. Вамболь, Л.Б. Яковлев, В.Л. Клеєвська // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. Н.Е. Жуковського «Харьк. авиаци. ин-т». – 2011. – С. 90.

53. Вамболь, С.О. Система комп'ютерних інформаційних технологій прогнозування негативних екологічних і соціально-економічних наслідків імовірних пожеж на будівлях (спорудах, інших складових) пожежонебезпечних об'єктів – СКІТ ПНО [Текст] / С.О. Вамболь, В.Л. Клеєвська // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковс-кого «Харьк. авиаци. ин-т». – Вып. 46. – Х., 2010. – С. 256 – 259.

54. Вамболь, С.О. Система управління екологічною безпекою при використанні пилопригнічуючих систем зрошення у процесі навантаження та розвантаження сипких матеріалів у портах [Текст] / С.О. Вамболь, Н.В. Кобріна, О.О. Трухмаєв // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковського «ХАИ». – Вып. 55. – Х., 2012. – С. 161 – 167.

55. Венгеров, И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели [Текст] : в 2 т. / И.Р. Венгеров. – Донецк : Норд-Пресс, 2008. – Т. 1: Анализ парадигмы. – 632 с.

56. Вернадский, В.И. Биосфера. Избранные труды по биогеохимии [Текст] / В.И. Вернадский. – М. : ВИНТИ, 1995. – 470 с.

57. Ветрова, Н.М. Эволюция теоретических подходов к управлению экологической безопасностью [Текст] / Н.М. Ветрова // Вісн. НУВГП. – 2007. – Вип. 1(37). – С. 3 – 9.

58. Влияние скорости ветра и рельефа местности на загрязнение атмосферного воздуха при утилизации взрывчатых веществ [Текст] / Н.В. Нечипорук, В.Н. Кобрин, Ю.А. Скоб и др. / Екологічна безпека: проблеми та шляхи вирішення : зб. наук. ст. III Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Алушта, АР Крим, 2007) : у 2 т. – Х. : Райдер. – 2007. – Т. 2. – С. 233 – 237.

59. Водяное пожаротушение. Спринклеры. Дренчеры. Система пожаротушения водяного пожаротушения EI FOG «Water Mist». Пожарная безопасность и оборудование "Пламя-EI", 2008. – Режим доступа: [www / URL: http://www.plamya-ei.ru/content/category/4/17/42/](http://www.plamya-ei.ru/content/category/4/17/42/) –Загл. с экрана.

60. Временные отраслевые методические указания по расчету плановых показателей проектов государственных планов по охране атмосферного воздуха. – М. : ОНТИ АКХ им. К.Д. Памфилова, 1983. – 40 с.

61. Выбор конструкции и результаты испытаний распылительного устройства для подавления каменноугольной пыли [Текст] / Н.В. Нечипорук, С.А. Вамболь, А.М. Ляшенко и др. // Проблеми охорони навколишнього при-

родного середовища та екологічної безпеки: зб. наук. пр. УкрНДІЕП. – Х., 2010. – Вип. XXXII. – С. 233 – 243.

62. Выбор системы распыла для пылеподавления при погрузочно-разгрузочных работах с сыпучими материалами [Текст] / С.А. Вамболь, А.М. Ляшенко, Д.Н. Макаренко, О.М. Бугаенко // Возможности використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали VII міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2008. – С. 12.

63. Гавва, В.Н. Экономическая оценка инженерных решений [Текст] : учеб. пособие / В.Н. Гавва, М.А. Голованова. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 1999. – 135 с.

64. Горстко, А.Б. Введение в моделирование эколого-экономических систем [Текст] / А.Б. Горстко, Г.А. Угольницкий. – Ростов н/Д. : Изд-во Рост. гос. ун-та, 1990. – 112 с.

65. Гошовский, С.В. Екологічна безпека техноприродних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком неологічних процесів [Текст] / С.В. Гошовский, Г.І. Рудько, Б.М. Преснер. – К. : ЗАТ «НІЧЛАВА», 2002. – 624 с.

66. Гращенко, Н.Ф. Повышение эффективности борьбы с пылью орошением [Текст] / Н.Ф. Гращенко, В.В. Суслов // Горное дело: сб. науч. тр. – Вып. I. – Караганда, 1970. – С. 184 – 187.

67. Грегори, К. Использование Visual C++ 6 : спец. издание. – М.; СПб.; К. : Изд. дом «Вильямс», 1999. – 864 с.

68. Грин, Х. Аэрозоли пыли, дымы, туманы [Текст] / Х. Грин, В. Лейп / под ред. Н.А.Фукса. – М. : Химия, Ленингр. отд-ние, 1979. – 428 с.

69. Гринюк, А.А. Разработка способа пылеподавления и предотвращения воспламенения метана при работе проходческих комбайнов: дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 1985 – 142 с.

70. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними [Текст] / А.М. Гришин. – М. : Наука, 1992. – 408 с.

71. Гусев, Ю.А. Разработка и экспериментальное исследование установки диспергирования на базе газотурбинного двигателя [Текст] / Ю.А. Гусев, В.С. Чигрин, С.В. Епифанов // Авиационно-космическая техника и технология. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – 1998. – С. 128 – 130.

72. Данилов, А.В. Экологически безопасное управление – залог устойчивого развития [Текст] / А.В. Данилов // Проблемы теории и практики управления. – М. : Междунар. науч.-исслед. ин-т проблем управления. – 1998. – № 3. – С. 19 – 24.

73. Данілішин, Б.М. Природно-техногенні катастрофи: проблема економічного аналізу та управління [Текст] / Б.М. Данілішин. – К. : УІНСіР, 2002. – 153 с.

74. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст] / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др. – М. : Машиностроение, 1983. – 372 с.

75. Двухфазные газожидкостные сопла в пожарных стволах [Текст] / Ю.А. Абрамов, И.Н. Грицына, В.Г. Селиванов, К.И. Сопленков // Пожарная безопасность – история, состояние, перспективы : материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф. – М., 1997. – Ч. 2. – С. 149 – 151.

76. Дейч, М.Е. Газодинамика двухфазных сред [Текст] / М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 384 с.

77. Джигрин, А.В. Автоматическая система взрывоподавления – локализации взрывов метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт [Текст] / А.В. Джигрин, Ю.В. Горлов, В.Д. Чигрин // Безопасность труда в промышленности. – М. : Науч.-техн. центр исследований проблем промышленной безопасности. – 2003. – № 8. – С. 22 – 26.

78. Дорогонцов, С.І. Сталий розвиток: траєкторія можливостей та обмежень [Текст] / С.І. Дорогонцов, О.М. Ральчук // Вісник НАН України. – 2000. – № 8. – С. 3 – 4.

79. Дорогонцов, С.И. Управление техногенно-экологической безопасностью в контексте парадигмы устойчивого развития: концепция системно-динамического решения [Текст] / С.И. Дорогонцов, А.Н. Ральчук. – К. : Наук. думка, 2002. – 200 с.

80. Дослідження процесу придушення пилу при завантаженні та розвантаженні кам'яного вугілля. Технічні рішення щодо зниження викидів кам'яновугільного пилу в атмосферу [Текст] / М.В. Нечипорук, Н.В. Кобріна, С.О. Вамболь та ін. // Проблеми охорони навколишнього середовища та екологічної безпеки : зб. наук. праць УкрНДІЕП. – Вип. 32. – Х., 2010. – С. 233 – 243.

81. Дремов, В.И. Управление средствами пылеподавления в механизированном проходческом забое [Текст] / В.И. Дремов, Н.В. Дремова, О.К. Кравцов // Проблемы аэрологии горных предприятий : сб. науч. тр. МГУ. – М., 1993. – С. 30 – 34.

82. Духин, С.С. Влияние эффекта обтекания на пылеулавливание при орошении [Текст] / С.С. Духин, В.П. Каганер // Известия вузов. Горный журнал, 1954. – № II. – С. 23 – 26.

83. Евенко, Л.И. Уроки американского менеджмента. Основы менеджмента [Текст] / Л.И. Евенко – М. : «Дело ЛТД», 1994. – С. 14 – 15.

84. Екологічна безпека, природно-техногенна безпека і цивільний захист в Україні [Текст]: навч. посіб. / В.М. Кобрін, П.М. Куліков, М.В. Нечипорук, С.О. Вамболь та ін.; Мін-во освіти і науки України, Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т». – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. Н.Е. Жуковського «Харьк. авіац. ін-т», 2007. – 406 с.

85. Ершов, С.В. Математическое моделирование трехмерных вязких течений в турбомашинах – современный взгляд [Текст] : в 2 т. / С.В. Ершов // Проблемы машиностроения. – 1998. – Т. 1, № 2. – С. 76 – 93.

86. Жиляев, Н.И. Эффективность пенного способа борьбы с пылью при комбайновой выемке крутых пластов Донбасса [Текст] / Н.И. Жиляев,

В.А. Гончаров, Г.А. Поздняков. – К. : Уголь Украины, 1977. – № 5. – С. 34 – 35.

87. Журавлев, В.П. Пылеподавление путем нагнетания растворов и эмульсий в угольные пласты [Текст] / В.П. Журавлев, И.Г. Ищук, Г.С. Забурдяев. – М. : ЦНИЗИуголь, 1973. – 73 с.

88. Зеркалов, Д.В. Экологическая безопасность [Текст]: учеб. пособие / Д.В. Зеркалов. – К. : Основа, 2009. – 513 с.

89. Зуев, Ю.В. Математическая модель двухфазной турбулентной струи [Текст] / Ю.В. Зуев, И.А. Лепешинский // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – М, 1981. – № 6. – С. 69 – 77.

90. Измалков, В.И. Экологическая безопасность, методология прогнозирования антропогенных загрязнений и основы построения химического мониторинга окружающей среды [Текст] / В.И. Измалков. – С.-Пб. : Наука, 1994. – 131 с.

91. Инженерная защита для окружающей среды [Текст]: учеб. пособие / под ред. О.Г. Воробьева. – С.-Пб. : Лань, 2002. – 288 с.

92. Исследование возможности замены осланцевания и сланцевых заслонов мокрыми способами в условиях шахт Донбасса: Отчет по теме № 40 / МакНИИ, 1965. – 41 с.

93. Исследование средств снижения избыточных давлений на стенках зданий застройки местности, вызванных взрывом газообразных смесей в атмосфере [Текст] / В.Н. Кобрин, Н.В. Нечипорук, Ю.А. Скоб и др. // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення : зб. наук. ст. у 2 т. – Т. 2 / УкрНДІЕП. – Х. : Райдер, 2008. – С. 298 – 303.

94. Исследование средств снижения последствий взрывов метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт [Текст] / С.А. Вамболь, Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов и др. // Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды : сб. науч. тр. 1-й Межотраслевой науч. -практ. конф. молодых ученых и специалистов / УкрГНТЦ «Энергосталь». – Х., 2012. – С. 386 – 390.

95. Ищук, И.Г. Оборудование и приборы для комплексного обеспыливания угольных шахт, разрезов и обогатительных фабрик [Текст] : каталог / И.Г. Михеев, И.Н. Громова. – М. : ЦНИЭИуголь, 1979. – 212 с.

96. Ищук, И.Г. Средства комплексного обеспыливания горных предприятий [Текст] / И.Г. Ищук, Г.А. Поздняков. – М. : Недра, 1991. – 253 с.

97. К вопросу моделирования процессов постановки мелкодисперсных водяных завес [Текст] / С.А. Вамболь, В.Н. Кобрин, В.Е. Костюк и др. // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали Х міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2011. – С. 6.

98. К вопросу прогноза удельного выхода пыли при разрушении горной породы резанием [Текст] / Ю.А. Кубайчук, Н.А. Дридж, Ю.В. Кириченко, Ю.А. Махова // Уголь. – 1999. – № 11. – С. 63 – 64.

99. Карагодин, Л.Н. О создании физических основ улавливания пыли [Текст] / Л.Н. Карагодин, В.П. Журавлев // Безопасность труда в промышленности. – М., 1978. – № 5. – С. 60 – 61.

100. Карагодин, Л.Н. Современное состояние борьбы с пылью на угольных шахтах [Текст] / Л.Н. Карагодин, И.Г. Ищук // Уголь. – 1977. – № 9. – С. 27 – 28.

101. Касимов, А.М. Современное состояние проблемы образования и накопления промышленных отходов в Украине [Текст] / А.М. Касимов // Экология и промышленность. – Х., 2007. – № 2. – С. 46 – 51.

102. Касимов, А.М. Современные методы контроля загрязнения атмосферного воздуха при управлении техногенной безопасностью на региональном уровне [Текст] / А.М. Касимов, В.М. Шмандий, А.Н. Кучук // Б-ка журн. ІТЕ. – Х. : КДПУ. – 2001. – № 3. – 136 с.

103. Качинский, А.Б. Екологічна безпека України: аналіз, оцінка та державна політика [Текст] / А.Б. Качинский, Т.А. Хміль. – К.: НІСД, 1997. – 127 с.

104. Качинський, А.Б. Екологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращання [Текст] / А.Б. Качинський. – К. : НІСД, 2001. – 312 с.

105. Киреев, А.М. Исследование пылевзрывобезопасности горных выработок в условиях шахт Донбасса: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Тульский политехнический институт. – Тула, 1968. – 21 с.

106. Кобрин, В.Н. Подавление пыли при погрузочно-разгрузочных работах [Текст] / В.Н. Кобрин, Н.В. Кобрина, С.А. Вамболь // Проблеми екологічної безпеки : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. – Кременчук: КДУ, 2009 – С. 9.

107. Кобрин, В.Н. Решение инженерных задач экологии средствами прикладных пакетов Excel, MathCad, Delphi, Visual C++ [Текст]: учеб. пособие по лаб. практикуму / В.Н. Кобрин, Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 109 с.

108. Кобрина, Н.В. Особенности и способы подавления каменноугольной пыли при погрузочно-разгрузочных работах [Текст] / Н.В. Кобрина // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення : зб. наук. ст. у 2 т. – Т. 2 / УкрНДІЕП. – Х. : Райдер, 2010. – С. 169 – 172.

109. Кобрина, Н.В. Подавление каменной пыли с использованием пены при погрузочно-разгрузочных работах [Текст] / Н.В. Кобрина, В.Ш. Эрсмамбетов, А.М. Ляшенко // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні – ІКТМ-2009 : Міжнар. наук.-техн. конф. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – 2009 – С. 60.

110. Кобрина, Н.В. Система пылеподавления для порталного крана [Текст] / Н.В. Кобрина, А.Г. Банников, О.А. Трухмаев // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали VIII міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2009. – С. 40.

111. Кобрина, Н.В. Способы подавления каменной пыли с использованием пены при погрузочно-разгрузочных работах [Текст] / Н.В. Кобрина // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні – ІКТМ-2009 : Міжнар.

наук.-техн. конф. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – 2009 – С. 56.

112. Количественная оценка риска химических аварий [Текст] / В.М. Колодкин, А.В. Мурин, А.К. Петров, В.Г. Горский. – Ижевск : Изд. дом «Удмуртский университет», 2001. – 228 с.

113. Комп'ютерна інтерактивна система аеродинамічного аналізу і удосконалення вінців турбомашин «Експерт»: Свідоцтво про державну реєстрацію виключної правомочності особи на твір ВП № 666, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т» / М.Л. Угрюмов, Ю.К. Чернишов, Ю.А. Скоб, С.А. Прокоф'єв (Україна). – Дата реєстрації 27.10.2000; Дата видачі 27.11.2000.

114. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна інтерактивна система інженерного аналізу та прогнозу руху хімічно реагуючих газоповітряних сумішей в задачах промислової аеродинаміки та екології атмосфери «FIRE»»: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 30079 / Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов, К.П. Коробчинський (Україна). – Дата реєстрації 28.08.2009.

115. Комплекс автоматизированных систем раннего выявления чрезвычайных ситуаций и оповещения ОАО «Запорожжкокс» / Е.А. Соловьев, Л.Я. Эйдельштейн, А.Н. Севастьянов, С.С. Кацило, Ю.А. Чернышов // Організація управління в надзвичайних ситуаціях : матеріали 11-ї Всеукр. наук.-практ. конф. – К. : ІДУЦЗУ УЦЗУ, 2009. – 425 с.

116. Косовцев, В.О. Національна безпека України: проблеми та шляхи реалізації пріоритетних національних інтересів [Текст] / В.О. Косовцев, І.Ф. Бінько. – К. : НІСД, 1996. – 61 с.

117. Костюк, В.Е. К выбору аппроксимирующего выражения для коэффициента аэродинамического сопротивления капли [Текст] / В.Е. Костюк // Науч.-метод. материалы по теории авиационных двигателей: сб. науч. тр. ХВВАИУ. – Вып. 6. – Х., 1988. – С. 13 – 21.

118. Кравец, В.М. Исследование и разработка рекомендаций по совершенствованию системы локализации взрывов угольной пыли в шахтах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Новочеркасский политехнический институт. – Новочеркасск, 1980. – 21 с.

119. Кроу, Д. Численные модели течений газа с небольшим содержанием частиц / Д. Кроу // тр. амер. о-ва. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. – Т. 104, № 3. – С. 114 – 122.

120. Ксенофонтова, А.И. Теория и практика борьбы с пылью в угольных шахтах [Текст] / А.И. Ксенофонтова, А.С. Бурчаков. – М. : Недра, 1965. – 231 с.

121. Кудряшов, В.В. Смачивание пыли и контроль запыленности воздуха в шахтах [Текст] / В.В. Кудряшов. – М. : Наука, 1979. – 200 с.

122. Кузьмин, С.П. [Автоматизированная система централизованного оповещения категоризованного города с численностью населения от 250 до](#)

[300 тысяч человек](#) [Текст] / С.П. Кузьмин // [Вестн. Самар. отрасл. науч.-исслед. ин-та радио](#), 2009. – С. 65 – 67.

123. Курапов, А.В. О влиянии размера водяных капель и скорости их движения на эффективность захвата пыли / А.В. Курапов, И.А. Нельсон. – Пермь : ПермНИУИ, 1966. – Т. 9. – 287 с.

124. Левкин, Н.Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины [Текст] / Н.Б. Левкин. – Макеевка : МакНИИ, 2002. – 392 с.

125. Легкодух, И.Г. Опыт применения низконапорного нагнетания воды в пласты Кузбасса [Текст] / И.Г. Легкодух, К.К. Буймов // Вентиляция шахт и предупреждение эндогенных пожаров: сб. науч. тр. Кемер. ВостНИИ. – 1975. – С. 130 – 133.

126. Лепешинский, И.А. Новая технология получения газок капельной струи и системы пожаротушения на ее основе [Текст] / И.А. Лепешинский // Конверсия в машиностроении. – 2005. – № 1 – 2. – С. 117 – 123.

127. Либецкий, К. Пылевые опасности в горнодобывающей промышленности [Текст] / К. Либецкий // Главный институт горного дела. – Катовице (Польша), 2004. – 486 с.

128. Липенков, А.Д. Безопасное развитие как повышение организованности эколого-экономических систем [Текст] / А.Д. Липенков // Проблемы экономики и управления. – 2004. – № 1 – 2. – С. 248 – 258.

129. Липин, Ю.И. Исследование и разработка импульсного орошения для проходческих комбайнов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Липин Юрий Иванович; – Кемер., 1983. – 20 с.

130. Лихачев, Л.Я. Борьба с пылью при работе горных комбайнов [Текст] / Л.Я. Лихачев, А.В. Трубицын, И.П. Белоногов. – Кемерово : Кн. изд-во, – 1974. – 156 с.

131. Лихачев, Л.Я. К вопросу осаждения тонкодисперсной пыли каплями жидкости [Текст] / Л.Я. Лихачев, В.Т. Медведев. // Борьба с силикозом.– М. : Наука. – 1977. – Т. 9. – С. 55 – 61.

132. Лихачев, Л.Я. Комплексное обеспыливание атмосферы в механизированных подготовительных и очистных забоях угольных шахт: автореф. дис. ... док. техн. наук: 05.26.03 / Л.Я. Лихачев. – Кемер., 1988. – 46 с.

133. Лихачев, Л.Я. Некоторые результаты исследований взаимодействия капель жидкости с тонкодисперсной угольной пылью [Текст] / Л.Я. Лихачев, В.Т. Медведев, В.В. Гурин // Сб. науч. тр. ВостНИИ. – Кемер., 1974. – Т. 21. – Борьба с пылью и производственным травматизмом на угольных шахтах – С. 35.

134. Лозанський, В.Р. Екологічне управління в розвинутих країнах світу у порівнянні з Україною [Текст] / В.Р. Лозанський. – Х. : УкрНДІЕП, 2000. – 68 с.

135. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1978. – 736 с.

136. Локализации лесных пожаров созданием минерализованных полос с помощью взрыва объемного шлангового заряда [Текст] / С.А. Вамболь, М.Л. Угрюмов, К.В. Корытченко, Ю.А. Скоб // Возможности використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали VIII міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2009. – С. 31.

137. Ляшенко, А.М. Испытания струйно-центробежного распылителя для пылеподавления при погрузочно-разгрузочных работах сыпучих материалов [Текст] / А.М. Ляшенко, С.А. Вамболь, Н.В. Кобрина // Возможности використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали IX міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2010. – С. 57.

138. Малышев, Ю.Н. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов [Текст] / Ю.Н. Малышев, К.Н. Трубецкой, А.Т. Айруни. – М. : Академии горных наук, 2000. – 519 с.

139. Масленникова, И.В. Управление экологической безопасностью [Текст] / И.В. Масленникова. – С.-Пб. : СПбУ, 2001. – 130 с.

140. Математическая модель, обеспечивающая орошение пылевого облака [Текст] / С.А. Вамболь, В.Е. Костюк, В.Н. Кобрин и др. // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – 2010. – С. 93.

141. Математическая модель, обеспечивающая орошение пылевого облака [Текст] / В.Н. Кобрин, В.Е. Костюк, Н.В. Кобрина, С.А. Вамболь // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. – Х., Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – 2010. – С. 93.

142. Математическое моделирование воздействия взрыва объемного шлангового заряда на лесной фитоценоз и растительный покров [Текст] / С.А. Вамболь, К.В. Корытченко, Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов // Проблеми пожежної безпеки : зб. наук. пр. УЦЗ України. – Вип. 7. – Х. : Фоліо. – 2009. – С. 149 – 165.

143. Математическое моделирование воздействия взрыва объемного шлангового заряда на лесной фитоценоз и растительный покров [Текст] / Ю.А. Скоб, К.В. Корытченко, М.Л. Угрюмов, С.А. Вамболь // Проблеми пожежної безпеки : сб. науч. тр. НУЦЗУ. – Вып. № 26. – Х., 2009. – С. 134 – 140.

144. Математическое моделирование области обрыва ЛГМ при взрыве в лесном фитоценозе [Текст] / С.А. Вамболь, М.Л. Угрюмов, К.В. Корытченко, Ю.А. Скоб // Возможности використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали IX міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2010. – С. 12 – 13.

145. Метод и автоматизированная компьютерная система оценки пожарного риска зданий [Текст] / В.А. Лыфарь, С.А. Вамболь, М.Л. Угрюмов, Ю.А. Скоб // Проблеми пожежної безпеки : сб. науч. тр. НУЦЗУ. – Вып. 26. – Х., 2009. – С. 71 – 78.

146. Метод прогнозирования последствий и модель автоматизированной системы поддержки принятия решений диспетчера опасного производства при возникновении аварийных ситуаций [Текст] / С.А. Вамболь, М.Л. Угрюмов, В.А. Лыфарь и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 51. – Х., 2011. – С. 178 – 185.

147. Метод прогнозирования последствий и модель автоматизированной системы поддержки принятия решений диспетчера опасного производства при возникновении аварийных ситуаций [Текст] / В.А. Лыфарь, С.А. Вамболь, Т.В. Гайденко, М.Л. Угрюмов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 51. – Х., 2011. – С. 178 – 185.

148. Методические подходы к выбору стратегии устойчивого развития территорий [Текст] : в 2 т.; под. науч. ред. А.Г. Шапаря. – Днепропетровск: ИППЭ НАНУ, 1996. – Т. 1. – 162 с.

149. Методы расчета турбулентных течений [Текст]; под ред. В. Колльмана. – М. : Мир, 1984. – 464 с.

150. Моделирование обеспечения экологической безопасности при использовании оросительной системы пылеподавления в процессе погрузки, разгрузки и транспортировки сыпучих материалов [Текст] / Н.В. Нечипорук, Н.В. Кобрина, В.Е. Костюк, С.А. Вамболь // Екологічна безпека : Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2010. – Вип. 2/2010 (10). – С. 20 – 22.

151. Моделирование области обрыва ЛГМ, формируемой при взрыве топливовоздушных зарядов в лесном фитоценозе [Текст] / С.А. Вамболь, К.В. Корытченко, Ю.А. Скоб и др. // Проблеми пожежної безпеки: зб. наук. пр. УЦЗ України. – Вип. 27. – Х. : Фоліо. – 2010. – С. 109 – 117.

152. Моделирование области обрыва ЛГМ, формируемой при взрыве топливовоздушных зарядов в лесном фитоценозе [Текст] / К.В. Корытченко, С.А. Вамболь, Ю.А. Скоб и др. // Проблеми пожарной безопасности : сб. науч. тр. НУЦЗУ. – Вып. № 27. – Х., 2010. – С. 109 – 117.

153. Моделирование процесса пылеподавления при погрузке, разгрузке и транспортировке сыпучих материалов [Текст] / В.Н. Кобрин, Н.В. Кобрина, В.Е. Костюк, С.А. Вамболь // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 48. – Х., 2010. – С. 248 – 252.

154. Моделирование процесса пылеподавления при погрузке, разгрузке и транспортировке сыпучих материалов [Текст] / Н.В. Кобрина, В.Е. Костюк, В.Н. Кобрин, С.А. Вамболь / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 48. – Х., 2010. – С. 248 – 252.

155. Моделирование процесса пылеподавления с использованием атомизаторов [Текст] / С.А. Вамболь, В.И. Калашникова, Н.В. Кобрина и др. // Проблемы створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. Н.Е. Жуковського «Харьк. авіац. ін-т». – 2011. – С. 69.

156. Моделирование снижения последствий взрывов угольной пыли и метано-воздушной смеси угольных шахт [Текст] / С.А. Вамболь, Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов, О.А. Трухмаев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25 : сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 2. Секция 3,4. – Волгоград : Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012; Х. : Национ. техн. ун-т «ХПИ», 2012. – С. 131 – 133.

157. Монин, А.С. Космология. Гидродинамика. Турбулентность [Текст] / А.С. Монин, П.Я. Полубаринова-Кочина, В.И. Хлебников. – М. : Наука, 1989. – 325 с.

158. Мохначук, И.И. Проблемы безопасности на угледобывающих предприятиях [Текст] / И.И. Мохначук // Уголь. – 2008. – № 2. – С. 21 – 26.

159. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2003 році [Текст] / керівники. підготовки Г.В. Рева та ін.; Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, НАН України. – К., 2004. – 436 с.

160. Недин, В.В. Борьба с пылью на рудниках [Текст] / В.В. Недин, О.Д. Нейков – М. : Недра, 1965. – 200 с.

161. Некос, В.Ю. Основы загалльної та глобальної неоекології [Текст] : навч. посіб.: у 2 ч. / В.Ю. Некос. – Х. : Прапор, 2001. – Ч. 2. – 287 с.

162. Нетлетон, М. Детонация в газах [Текст] : монография / М. Нетлетон; пер. с англ. – М. : «Мир», 1989. – 278 с.

163. Нечипорук, Н.В. Математическое моделирование экологических процессов: учеб. пособие по лаб. практикуму [Текст] / Н.В. Нечипорук, Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т «Харьк. авіац. ін-т», 2007. – 89 с.

164. Нечипорук, Н.В. Обеспечение экологической безопасности при погрузочно-разгрузочных работах с сыпучими материалами [Текст] / Н.В. Нечипорук, Н.В. Кобрина, О.А. Трухмаев // Проблемы створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. Н.Е. Жуковського «Харьк. авіац. ін-т». – 2009. – С. 112.

165. Нечипорук, Н.В. Параметры и показатели качественного распыла при пылеподавлении [Текст] / Н.В. Нечипорук, Н.В. Кобрина // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ'2009 : тез. доп. Міжнар. наук.-техн. конф. – Х., 2009. – С. 58.

166. Нечипорук, Н.В. Распылительные устройства для подавления каменноугольной пыли [Текст] / Н.В. Нечипорук, Н.В. Кобрина, А.М. Ляшенко //

Проблеми екологічної безпеки : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. – Кременчук: КДУ, 2009 – С. 8.

167. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред [Текст] : в 2 т. / Р.И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – Т. 1. – 384 с.

168. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред: в 2 ч. [Текст] / Р.И. Нигматулин. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – Ч. 1. – 464 с.

169. Нигматулин, Р.И. Основы механики и энергичных сред [Текст] / Р.И. Нигматулин. – М. : Наука, 1978. – 264 с.

170. Никитин, А.Т. Экология охрана природы, экологическая безопасность: учеб. пособие [Текст] / А.Т. Никитин, С.А. Степанов. – М. : ММНЭПу, 2000. – 648 с.

171. Никифорова, О.И. Сравнение эффективности действия различных механизмов пылевого захвата водным аэрозолем [Текст] / О.И. Никифорова // Горный журнал. – М. : ИД «Руда и металлы». – 1995. – № 5. – С. 64 – 67.

172. Новые способы борьбы с пылью в угольных шахтах [Текст] / Ф.М. Гельфанд, В.П. Журавлев, А.П. Поелуев, Л.И. Рыжих. – М. : Недра, 1975. – 285 с.

173. Новые способы борьбы с пылью в угольных шахтах [Текст] / Ф.М. Гельфанд, В.П. Журавлев, А.П. Поелуев, Л.И. Рыжих. – М. : Недра, 1975. – 288 с.

174. О течении газожидкостной среды в соплах заданной геометрии. Вопросы газотермодинамики энергоустановок.: тем. сб. науч. тр./ редкол.: В.Г. Селиванов и др. – Вып. 2. – Х. : ХАИ. – 1975.– С. 19 – 27.

175. Однофазное распылительное устройство для подавления каменноугольной пыли [Текст] / С.А. Вамболь, О.М. Бугаенко, Н.В. Кобрина, О.А. Трухмаев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 53. – Х., 2012. – С. 204 – 208.

176. Орлик, В.П. Способы борьбы с местными скоплениями метана в подготовительных выработках угольных шахт: учеб. пособие [Текст] / В.П. Орлик, А.М. Симонов. – Донецк: Донбасс. – 2002. – 67 с.

177. Орлов, А.И. Проблемы управления экологической безопасностью [Текст] / А.И. Орлов, В.Н. Федосеев // Менеджмент в России и за рубежом. – М., 2000. – № 6. – С. 22 – 29.

178. Основные направления исследований, основанные на семантическом анализе текстов [Электронный ресурс] / С.-Пб. гос. ун-т, фак. прикладной математики и процессов управления. – Режим доступа: [www/URL: http://arcp.arpmath.spbu.ru/ru/staff/tuzov/onapr.html/](http://arcp.arpmath.spbu.ru/ru/staff/tuzov/onapr.html/). – Загл. с экрана.

179. Оценка экономической эффективности применения мероприятий по обеспечению безопасности жизнедеятельности на производстве [Текст] : учеб. пособие / А.В. Гайдачук, М.А. Голованова, О.Б. Кивиренко, И.В. Кулишова. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 53 с.

180. Пажи, Д.Г. Распылители жидкостей [Текст] / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М. : Химия, 1979. – 216 с.
181. Пенообразователь для подавления пылеобразования [Электронный ресурс] / ООО «Фирма «Союз» Лтд.», Х., 2003. - Режим доступа: [www/URL: http://www.sofir.com.ua/pil.htm](http://www.sofir.com.ua/pil.htm) – загл. с экрана.
182. Пережилов, А.Е. Характер взаимосвязи приведенной запыленности воздуха и скорости подачи комбайна по выемке угля [Текст] / А.Е. Пережилов, Е.Я. Диколенко, В.Н. Гетопанов // Уголь. – 1994. – № 1. – С. 19 – 21.
183. Петрухин, П.М. Борьба с угольной и породной пылью [Текст] / П.М. Петрухин. – М. : Недра, 1981. – 271 с.
184. Петрухин, П.М. Теоретические основы пылевзрывозащиты способами, основанными на применении воды [Текст] / П.М. Петрухин, В.Н. Качан // Безопасность труда в угольных шахтах: тр. МакНИИ.– М. : Недра, 1972. – Т. XXII. – С. 89 – 103.
185. Пожарные стволы с двухфазными газожидкостными соплами [Текст] / Ю.А. Абрамов, И.Н. Грицына, В.Г. Селиванов, К.И. Сопленков // Вісн. Харк. держ. ун-ту «Актуальні проблеми філософії науки і сучасних технологій». – Х., 1997. – № 388. – С. 204 – 205.
186. Поздняков, Г.А. Теория и практика борьбы с пылью в механизированных забоях [Текст] / Г.А. Поздняков, Г.К. Мартынов. – М. : Наука, 1983. – 121 с.
187. Поздняков, Т.А. Применение пылеулавливающих установок в шахтах [Текст] : обзор / Г.А. Поздняков, И.Г. Ищук. – М.: ЦНИЭИуголь, 1978. – 44 с.
188. Пономарева, И.Б. Взаимодействие высокомолекулярных веществ с углесодержащими сорбентами [Текст] / И.Б. Пономарева // Обработка дисперсных материалов и сред: сб. науч. тр. Ин-та биокolloид. химии им. Ф.Д. Овчаренко НАН Укр. – Вып. 9. – Одесса, 1999. – С. 184 – 189.
189. Пономарьова, І.Б. Взаємодія поверхнево-активних речовин з природним вугіллям в процесах його видобутку і переробки: автореф. дис. ... канд. хім. наук: 02.00.11 / Пономарьова Ірина Борисівна; НАН України. Ін-т біокolloїд. хімії ім. Ф.Д. Овчаренка. – К., 2002. – 20 с.
190. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах [Текст]. – М. : Недра, 1973. – 512 с.
191. Прибор контроля пылевзрывобезопасности горных выработок типа ПКП [Текст] / А.А. Трубицын, М.Е. Попов, С.Н. Ворошилов, Я.С. Ворошилов // Науч. сообщ. ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. – 2005. – Вып. 321. – С. 89 – 103.
192. Применение водовоздушных эжекторов для борьбы с пылью при работе выемочных и проходческих комбайнов [Текст] / Л.Я. Лихачев, И.П. Белоногов, А.В. Трубицын и др. // Труды ВостНИИ. – Прокопьевск, 1974. – Т. 21. – С. 7 – 18.

193. Природна та техногенна безпека геосферного простору у зв'язку з розвитком небезпечних природних, техноприродних і техногенних процесів [Текст] / Г.І. Рудько, І.М. Ольшанська, Н.О. Шевченко, В.П. Медвідь // Техногенно-екологічна безпека як умова сталого розвитку України: матеріали 2-ї наук.-практ. конф. – К. : Знання. – 2002. – С. 183 – 187.

194. Прогнозирование последствий взрывов в атмосфере [Текст] / В.Н. Кобрин, Н.В. Нечипорук, Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. Н.Е. Жуковського «Харьк. авіац. ін-т». – 2007. – С. 87.

195. Прогнозирование характерных зон заражения при проливе химически вредных веществ [Текст] / В.Н. Кобрин, Н.В. Нечипорук, Ю.А. Скоб и др. // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення : зб. наук. ст. у 2 т. – Т. 1 / УкрНДІЕП. – Х. : Райдер, 2009. – С. 47 – 51.

196. Пылеподавление в местах добычи угля и руды [Электронный ресурс] / INTELPROPERTY s.r.o. – Режим доступа: [www/URL: http://www.intelproperty.ru](http://www.intelproperty.ru).

197. Пылеподавление. [Электронный ресурс] / В.И. Игнатов – ООО «Новые технологии и инжиниринг». – Режим доступа: [www/URL: http://www.ntds.ru](http://www.ntds.ru) – 10.12.2004 г. – Загл. с экрана.

198. Разработка и испытания однофазного струйно-центробежного распылителя [Текст] / А.М. Ляшенко, Н.В. Нечипорук, Н.В. Кобрин, С.А. Вамболь // Екологія. Людина. Суспільство : зб. наук. пр. XIII Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених. – К. : НТУУ «КПІ». – 2010. – С. 166 – 167.

199. Разработка концепции новых способов и устройств для борьбы с верховыми лесными пожарами: отчет о НИР / Том. ун-т; Рук. А.М. Гришин.– Томск, 1989. – 276 с.

200. Распылительное устройство, обеспечивающее высокую тонкость распыла воды [Текст] / С.А. Вамболь, А.М. Ляшенко, Н.В. Кобрин, В.Н. Кобрин // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали VIII міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2009. – С. 41.

201. Распылительное устройство, обеспечивающее высокую тонкость распыла воды / С.А. Вамболь, А.М. Ляшенко, Н.В. Кобрин, В.Н. Кобрин // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали VIII міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2009. – С. 41.

202. Расчет дальности двухфазной струи пожаротушащей установки на базе газотурбинного двигателя [Текст] / В.С. Чигрин, Ю.А. Гусев, С.В. Епифанов, О.М. Муравченко // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. ХАИ. – Вып. 14. – Х., 1999. – С. 18 – 20.

203. Рева, Г.В. Метод розрахунку циліндричних відбивачів вибухових хвиль для гасіння лісових пожеж: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01 / Рева Григо-

рій Васильович; Донецький державний технічний університет. – Донецьк, 2000. – 18 с.

204. Результаты численного моделирования пылеподавления при различных условиях орошения пылевого облака [Текст] / С.А. Вамболь, В.Е. Костюк, Н.В. Кобрина и др. // Возможности використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали ІХ міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2010. – С. 60.

205. Реймерс, Н.Ф. Экология [Текст] / Н.Ф. Реймерс. – М. : Россия молодая, 1994. – 367 с.

206. Рейнольдс, А. Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях [Текст] / А. Дж. Рейнольдс. – М. : Энергия, 1979. – 408 с.

207. Романов, К.В. Исследование эффективности инерционного захвата частиц аэрозоля сферой: дис. ... канд. физ.-мат. наук: – Одесса, 1973. – 162 с.

208. Романов, К.В. Обтекание сферы равномерным потоком несжимаемой жидкости при числах Рейнольдса больше или равных 40 [Текст] / К.В. Романов, С.К. Чернышев. – Физика аэродисперсных систем. – 1979. – Вып. 9. – С. 42 – 48.

209. Руденко, К.Г. Обеспыливание и пылеулавливание при обработке полезных ископаемых [Текст] / К.Г. Руденко, А.В. Калмыков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1987. – 263 с.

210. Руководство по борьбе с пылью и пылевзрывозащита на угольных и сланцевых шахтах [Текст]. – Кемерово, 1992. – 160 с.

211. Рыжков, Ф.Н. Эффективность подавления пыли водными растворами в зависимости от их вязкости [Текст] / Ф.Н. Рыжков, Л.М. Ягнышева, Т.П. Зиновьева // Труды ЦНИИПП. – Вып. 5. Оздоровление условий труда на горнообогатительных предприятиях цветной металлургии. – Свердловск, 1971. – С. 19 – 26.

212. Садеков, А.А. Экологический вызов и проблемы устойчивого развития [Текст] / А.А. Садеков // Прометей: региональный сб. научн. тр. по экономике. – Донецк, Институт экономико-правовых исследований НАН Украины. – 2004. – Вып. 14. – С. 18 – 24.

213. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 176 с.

214. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. - Л. : Гидрометеиздат, 1986. – 183 с.

215. Сверхзвуковой струйно-форсуночный аппарат (СФА). НПО Энергомашавтоматика. [Электронный ресурс], 2006. – Режим доступа: [www/ URL: http://npoema.ru/texts/5](http://npoema.ru/texts/5).

216. Селиванов, В.Г. Некоторые особенности процесса разгона жидкости газом в двухфазных соплах / В.Г. Селиванов // Вопросы газотермодинамики энергоустановок : сб. науч. тр. ХАИ. – Вып. 3. – Х., 1976. – С. 62 – 77.

217. Селиванов, В.Г. Экспериментальная установка для испытаний пожарных стволов [Текст] / В.Г. Селиванов, И.Н. Грицына, А.М. Ляшенко //

Проблемы пожарной безопасности : сб. науч. тр. НУЦЗУ. – Вып. № 4. – Х., 1998. – С. 172 – 174.

218. Селиванов, В.Г. Экспериментальные исследования макетного образца пожарного ствола с газожидкостным соплом [Текст] / В.Г. Селиванов, И.Н. Грицына, А.М. Ляшенко // Проблемы пожарной безопасности : сб. науч. тр. НУЦЗУ. – Вып. № 2. – Х., 1997. – С. 138 – 141.

219. Семенов, В. Екологічний менеджмент: навч. посіб. [Текст] / В.Ф. Семенов, О.Л. Михайлюк, Т.П. Галушкіна. – К. : Цент навчальної літ-ри, 2004. – 516 с.

220. Сергиенко, И.В. Общая концепция управления риском экологических, техногенных и социогенных катастроф [Текст] / И.В. Сергиенко, В.М. Яненко, К.Л. Атоев // Кибернетика и системный анализ. – 1997. – № 2. – С. 65 – 86.

221. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы: МЧС РФ: свод правил СП1.13130; утв. Приказом МЧС России № 171 от 25.03.09; введ. в действие с 25.03.09. – Балашиха : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. – 43 с.

222. Скоб, Ю.А. Численное моделирование взрывов газо-воздушных смесей в атмосфере [Текст] / Ю.А. Скоб // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007.– № 3(39). – С. 72 – 78.

223. Смирнова В.Г. Организация и ее деловая среда: 17-модульная программа для менеджеров. Управление развитием организации. Модуль 2 [Текст] / В.Г. Смирнова. – М. : ИНФРА-М, 1999. – 240 с.

224. Соколов, Е.Я. Струйные аппараты [Текст] / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 350 с.

225. Способы вскрытия, подготовки и системы разработки шахтных полей [Текст] / Б.Ф. Братченко, М. И. Устинов, Л. Н. Гапанович и др. – М : Недра, 1985. – 494 с.

226. Стернин, Л.Е. Многофазные течения газа с частицами [Текст] / Л.Е. Стернин, А.А. Шрайбер. – М. : Машиностроение, 1994. – 320 с.

227. Стратегічні напрямки переходу України на засади сталого розвитку в контексті її інтеграції до Європейського співтовариства; під ред. акад. НАН України Е.В. Соботовича. – К. : Салютіс, 2005. – 44 с.

228. Страус, В. Промышленная очистка газов [Текст] / В.М. Страус. – М. : Химия, 1981. – 616 с.

229. Сугак, Е.В. Очистка газовых выбросов от высокодисперсных частиц в дисперсионно-кольцевом потоке. Химия растительного сырья / Е.В. Сугак, М.А. Войнов, Н.Ю. Желткова. – М., 2000.– № 4. – С. 85 – 91.

230. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник; под общ. ред. В.А. Григорьева. – М. : Энергоатомиздат, 1988.– 560 с.

231. Тимошенко, В.А. Технология решения на ЭВМ задач газовой динамики [Текст] / В.А. Тимошенко, А.В. Лиманский. – К. : Наук. думка, 1981. – 232 с.

232. Ткач, В.Я. Методы прогноза выбросоопасности шахтных пластов [Текст] / В.Я. Ткач. – К. : Техніка, 1980. – 190 с.

233. Толченкин, Ю.А. Роль переподготовки руководителей и специалистов в повышении промышленной безопасности на шахтах отрасли [Текст] / Ю.А. Толченкин, Ф.А. Чекветадзе, Н.Л. Разумняк // Уголь. – 2007. – № 10. – С. 41 – 44.

234. Трубицын, А.А. Исследование оптимальных параметров оросительного факела [Текст] / А.А. Трубицын, Н.В. Крылова // Борьба с пневмокониозом в условиях Сибири и Дальнего Востока: тез. доклада Иркутск, 1982 г.

235. Трубицын, А.А. Малогабаритные пылеотсасывающие установки с гидравлическим приводом [Текст] / А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, К.К. Буймов // Способы и средства повышения безопасности в угольных шахтах: тр. ВостНИИ. – Кемерово, 1988.

236. Трубицын, А.А. Технологические основы системы управления пылевой обстановки в угольных шахтах для обеспечения безопасности ведения горных работ: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. – Люберцы, 2002. – 216 с.

237. Турбулентное смешение газовых струй [Текст] / под ред. Г.Н. Абрамовича. – М. : Наука, 1974. – 272 с.

238. Турбулентность [Текст] / Под ред. П. Брэдшоу. – М. : Машиностроение, 1980. – 343 с.

239. Турбулентность: принципы и применение [Текст] / под ред. У. Фроста и Г. Моулдена. – М. : Мир, 1980. – 535 с.

240. Турбулентные течения газозвеси [Текст] / А.А. Шрайбер, Л.Б. Гавин., В.А. Наумов и др. – К. : Наук. думка, 1978. – 293 с.

241. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов от пыли [Текст] / В.Н. Ужов. – М., 1981. – 392 с.

242. Уоллис, Г. Одномерные двухфазные течения [Текст] / Г. Уоллис. – М. : Мир, 1970. – 440 с.

243. Управление опасными промышленными отходами. Современные проблемы и решения [Текст]: монография / А.М. Касимов, Л.Л. Товажнянский, В.И. Тошинский, Д.В. Сталинский. – Х. : НТУ «ХПИ», 2009. – 500 с.

244. Установки для пылеподавления на основе конверсионного использования авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / О.М. Бугаенко, В.Н. Кобрин, Н.В. Нечипорук, С.А. Вамболь // Екологічна безпека : Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2012. – Вип. 1/2012 (13). – С. 73 – 76.

245. Устройства для обеспечения экологической безопасности при погрузке-разгрузке угля в Мариупольском торговом морском порту [Текст] / А.М. Ляшенко, Н.В. Кобрина, А.Г. Банников, С.А. Вамболь // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар.

наук.-техн. конф. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – 2009. – С. 111.

246. Федеральный закон Российской Федерации «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» № 123-ФЗ.

247. Феськов, М.И. Исследование пылеподавления орошением в горных выработках [Текст] / М.И. Феськов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1976. – № 2. – С. 94 – 97.

248. Феськов, М.И. Исследование улавливания пыли каплями воды в активной части факела центробежной форсунки [Текст] / М.И. Феськов // Известия вузов. Горный журнал, 1979. – № 8. – С. 52 – 54.

249. Физика взрыва [Текст] / Под ред. К.П. Станюковича. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1975. – 704 с.

250. Физико-химические процессы в газовой динамике [Текст]: компьютеризованный справ. в 3 т.; под ред. Г.Г. Черного и С.А. Лосева. – М. : Науч.-изд. центр механики. – 2002. – Т. 2.: Физико-химическая кинетика и термодинамика. – 368 с.

251. Физические аспекты пылеподавления и распылительные устройства для их реализации [Текст] / А.М. Ляшенко, Н.В. Нечипорук, Н.В. Кобрина, С.А. Вамболь // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 48. – Х., 2010. – С. 234 – 239.

252. Фонтанные насадки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.masterfontan.ru/articles/files/f_nasadki.doc](http://www.masterfontan.ru/articles/files/f_nasadki.doc). – Загл. с экрана.

253. Фукс, Н.А. Высокодисперсные аэрозоли [Текст] / Н.А. Фукс. – М. : АН СССР, 1969. – 268 с.

254. Характеристики и результаты испытаний водовоздушного эжектора для пылеподавления [Текст] / С.А. Вамболь, А.М. Ляшенко, Н.В. Нечипорук и др. // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. – Х., Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – 2010. – С. 95.

255. Хван, Т.А. Промышленная экология [Текст] / Т.А. Хван – Ростов/нД.: Феникс, 2003. – 320 с.

256. Хлобыстов, Е.В. Методологические аспекты оценки эколого-экономической безопасности промышленного комплекса [Текст] / Е.В. Хлобыстов, Ю.В. Кобзарь, И.В. Патока // Планирование экономического развития регионов с учетом их экологической безопасности.: материалы науч.-практ. Семинара. – К. : 1995. – С. 53 – 59.

257. Холзнер, С. Visual C++ 6 [Текст]: учеб. курс / С. Холзнер. – СПб. : Питер, 1999. – 576 с.

258. Циклаури, Г.В. Адиабатные двухфазные течения [Текст] / Г.В. Циклаури, В.С.Данилин, Л.И. Селезнев. – М. : Атомиздат, 1973. – 448 с.

259. Ципенко, А.В. Математическая модель дисперсного неравновесного потока с большой долей жидкости в сопле с учетом пленки, столкновений и аэродинамического дробления капель [Текст] / А.В. Ципенко. – М. : НИИ НТ при МАИ. – 2004. – 46 с.

260. Ципенко, А.В. Численное исследование дальнобойности газожидкостных струй дисперсной системы пожаротушения [Текст] / А.В. Ципенко // Науч. вестн. МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика и прочность. – 1999. – № 15 – С. 73 – 74.

261. Черняховский, Э.Р. Управление экологической безопасностью: учебно-практ. пособие [Текст] / Э.Р. Черняховский – М. : Альфа-Пресс, 2007. – 248 с.

262. Черосвитов, А. Visual C++ 6 и MFC. Курс MCSD для профессионалов [Текст] / А. Черосвитов. – СПб. : Питер, 2000. – 544 с.

263. Численная оценка последствий взрыва водорода в атмосфере [Текст] / К.П. Коробчинский, Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов, В.В. Шенцов // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. ХАИ. – № 1(48). – Х., 2008. – С. 79 – 88.

264. Численное моделирование атомайзерного обеспыливания [Текст] / Н.В. Кобрина, С.А. Вамболь, В.Е. Костюк и др. // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. – Х., Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиационн. ин-т». – 2010. – С. 91.

265. Численное моделирование обеспечения экологической безопасности при использовании для пылеподавления оросительных систем типа «Брандспойт» [Текст] / В.Н. Кобрин, Н.В. Кобрина, В.Е. Костюк, О.М. Бугаенко // Екологічна безпека : Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2011. – Вип. 1/2011 (11). – С. 24 – 25.

266. Численное моделирование процесса распространения продуктов горения при пожаре в зданиях с атриумами [Текст] / Ю.Д. Митасов, А.Ф. Редько, Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов // Наук. вісн. будівництва: зб. наук. пр. ХОТВ АБУ. – Вип. 14. – Х., ХДТУБА. – 2001. – С. 258 – 262.

267. Численное моделирование формирования водяной струи однофазных распылительных устройств [Текст] / С.А. Вамболь, В.Ш. Эрсмамбетов, Н.В. Кобрина, О.А. Трухмаев // Вестн. Кременчуг. Нац. ун-та. – Вип. 1/2012(72). – Кременчук : КрНУ, 2012. – С. 161 – 163.

268. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. – М. : Наука, 1976. – 400 с.

269. Шевцов, Н.Р. Взрывозащита горных выработок [Текст] / Н.Р. Шевцов. – Донецк : Нордпресс, 2002. – 286 с.

270. Шевчук, В.Я. Екологічне управління : підручник / В.Я.Шевчук, Ю.М. Саталкін, Г.О. Білявський. – К. : Либідь, 2004. – 432 с.

271. Шенг, Дж. С. Обзор численных методов решения уравнений Навье-Стокса для течений сжимаемого газа [Текст] / Дж. С. Шенг // Аэрокосмическая техника. – 1986.– № 2. – С. 65 – 92.

272. Шишацкий, А.Г. Исследование и разработка методов и средств борьбы с пылью: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Г. Шишацкий. – Дн., 1978. – 22 с.

273. Шишацкий, А.П. Установка пылеподавления способом открытого способом открытого форсуночного распыления технической воды [Электронный ресурс] / А.П. Шишацкий, П.О. Федоров, Т.К. Жанберова. – Дн.: 2006. – Промышленная группа «Гейзер» – Режим доступа: [www/ URL: http://www.geyser.dp.ua](http://www.geyser.dp.ua) – Загл. с экрана.

274. Шмандий, В.М. Теоретические и практические основы управления техногенной безопасностью на региональном уровне [Текст] / В.М. Шмандий // Захист довкілля від антропогенного навантаження. – Вип. 4(6). – Кременчук, 2001.– С. 95 – 100.

275. Шмандий, В.М. Управление техногенной безопасностью урбосистемы на стадии образования и поступления отходов в окружающую среду [Текст]: монография / В.М. Шмандий. – Х., 2001. – 152 с.

276. Шмандий, В.М. Управление экологической безопасностью на рациональном уровне: дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01; защищена 22.01.04; увр. 14.04.04 / Шмандий Владимир Михайлович. – Х., 2003. – 381 с.

277. Шмандій, В.М. Екологічна безпека [Текст]: підручник / В.М. Шмандій, В.Ю. Некос. – Х.: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2008. – 436 с.

278. Шмандій, В.М. Практичні основи розробки комплексної системи заходів по управлінню техногенною безпекою в техногенно навантаженому регіоні [Текст] / В.М. Шмандій // Вісн. НТУ «ХПІ». – 2002. – № 20. – С. 217 – 221.

279. Шохин, В. Н. Гравитационные методы обогащения [Текст] / В.Н. Шохин, А. Г. Лопатин. – М. : Недра, 1993. – 313 с.

280. Шурыгин, А.П. Расчет форсунок для распыливания жидкостей [Текст] / А.П. Шурыгин. – М. : МЭИ, 1972. – 372 с.

281. Щетилин, А.Г. Измерение коэффициента захвата рудничной пыли каплями воды экспрессным путем [Текст] / А.Г. Щетилин, Г.Д. Сопиков. // Материалы совещания Центральной комиссии по борьбе с силикозом. – М. : ИГД им. А.А. Скочинского. – 1970 – С. 25 – 27.

282. Экологическая безопасность, устойчивое развитие и природоохранные проблемы [Текст] / под ред. К.Ф. Фролова. – М. : Знание, 1999. – 704 с.

283. Экология горного производства [Текст] : учеб. для вузов / Г.Г. Мирзаев, Б.А. Иванов, В.М. Щербakov и др. – М. : Недра, 1991. – 320 с.

284. Экология, охрана окружающей среды, экологическая безопасность [Текст]: учеб. пособие / под общ. Ред. А.Т. Никитина, С.А. Степанова. – М. : 2000. – 648 с.

285. Экология, охрана природы, экологическая безопасность [Текст] / под ред. В.И. Данилова-Данильяна. – М. : Изд-во МИЭПУ, 1997. – 744 с.

286. Экономическая эффективность средств пылеподавления на угольных шахтах [Текст] – Донецк: Ин-т экономики промышленности НАН Украины, 1975. – 28 с.

287. Экспериментальное определение дисперсности частиц, образующихся при работе атомайзера [Текст] / С.А. Вамболь, А.М. Ляшенко, В.И. Калашникова и др. // Возможности використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали X міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2011. – С. 23.

288. Элементный состав пыли как источника загрязнения атмосферного воздуха в мариупольском торговом порту [Текст] / С.А. Вамболь, Н.В. Кобрина, О.А. Трухмаев // Возможности використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій : матеріали X міжвуз. наук.-практ. конф. – Х., 2011. – С. 53 – 54.

289. Яцик, А.В. Екологічна безпека в Україні [Текст] / А.В. Яцик. – К., 2003. – 216 с.

290. МГ-34-70-010-83 «Методики определения валовых выбросов вредных веществ в атмосферу» – М. : СПО Союзтехэнерго, 1984. – 35 с.

291. Взрывные явления. Оценки и последствия [Текст]: в 2 кн.; пер. с англ. / У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др.; Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. – М. : Мир, 1986. – 19 с.

292. Управление промышленными отходами [Текст] : учеб. пособие : в 2 кн. / А.М. Гриценко, Е.К. Макаровский, И.В. Черванев, И.А. Шеренков.– Кн. 1. – Ч. 1: Промышленные отходы и окружающая среда в современном мире. – Х. : РИП «Оригинал», 2000. – 80 с.

293. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: в 2 ч. / пер. с англ.; под ред. С. Калверга и Г.М. Инглунда. – М., 1988. – Ч. 1. – 760 с.

294. Золотарев, В.М. Одномерные устойчивые распределения [Текст] / В.М. Золотарев. – М. : Наука, 1983. – 304 с.

295. Залесский, Л.Б. Экологический менеджмент : учеб. пособие для вузов [Текст] / Залесский Л.Б. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 220с. – (Серия «Oikos»).

296. A Comparison of the Fire Suppression Performance of Compressed-Air Foam and Foam-Water Sprinkler Systems for Class B. Hazards. / Kim, A.; Crampton, G.; Asselin, J.P. - National Research Council Canada. IRC-RR-146, 2004. – Режим доступа: www/ URL: <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>. – Загл. с экрана.

297. Computational Modeling of Pressure Effects from Hydrogen Explosions / E.A. Granovski, V.A. Lyfar, Yu.A. Skob, M.L. Ugryumov // Abstracts Book and CD-ROM Proceedings of the 2-nd International Conference on Hydrogen Safety. – San Sebastian (Spain). – 2007. – 15 p. (ICHS Paper No. 1.3.52).

298. Computational Modeling of Pressure Effects from Hydrogen Explosions / E.A. Granovski, V.A. Lyfar, Yu.A. Skob, M.L. Ugryumov // Abstracts Book and CD-ROM Proceedings of the 2-nd International Conference on Hydrogen Safety. – San Sebastian (Spain). – 2007. – 15 p. (ICHS Paper No. 1.3.52).

299. Dijkstra E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. In *Numerische Mathematik*, 1 (1959). – S. 269 – 271.
300. Dust Suppression Systems Control Airborne Particles. MARTIN® FOG Dust Suppression System. - Режим доступа : [www/ URL: http://martin-eng.com/products/martin-fog-dust-suppression-system-0](http://www.martin-eng.com/products/martin-fog-dust-suppression-system-0). - Загл. с экрана.
301. Effective Temperature Control for Cement Kiln Off-Gases By: Ron A. Berube.
302. Fireguard high velocity water spray nozzle. Fireguard safety equip co ltd. London United Kingdom, 2005. – Режим доступа: [www/ URL: www.fireguard-uk.com](http://www.fireguard-uk.com) - Загл. с экрана.
303. Golitzine N., Sharp C.R., Badham L.G. Nat. Aero. Estab. Canada, R14ME-186, 1951.
304. <http://npoema.ru/texts/5> – Загл. с экрана.
305. http://www.plant-maintenance.com/articles/dust_suppression.pdf – Загл. с экрана.
306. Hydraulic Spray Nozzles. The Nozzle Specialists. Technical Projects. Sydney Australia, 2004 – 2008. – Режим доступа: [www/ URL: http://www.tecpro.com.au](http://www.tecpro.com.au) – Загл. с экрана.
307. Jackson M.K., Davies T.W. Nozzle design for coherent water jet production. Department of Chemical Engineering, Exeter University, Exeter, Devon, U.K. Proceedings of the Second U.S. WATER JET CONFERENCE. Rolla, Missouri Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana May 24 – 26, 1983. – P. 53 – 88.
308. Jurgen W. Frick. User benefits of modern air mist nozzle and secondary cooling system technology. Lechler GmbH & Co KG, Germany.- Режим доступа: [www/ URL: http://www.lechler.de/pdf/user_benefits_of.pdf](http://www.lechler.de/pdf/user_benefits_of.pdf) – Загл. с экрана.
309. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972.
310. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – No. 3. – P. 269 – 289.
311. Le Bouffant, Courbon P. La Lutte contre les Poussières au Moyen de la Pulvérisation d'eau. – Revue de l'Industrie Minière, 1960, N 10, p.761-764.
312. Long distance spray nozzles. Everloy Spray Nozzles. KYORITSU GOKIN CO., LTD, 2005. – Режим доступа: [www/ URL: http://www.everloy-spray-nozzles.com/en/product/others/other02.html](http://www.everloy-spray-nozzles.com/en/product/others/other02.html). – Загл. с экрана.
313. Makarand Joshi Failure Of Dust Suppression Systems At Coal Handling Plants Of Thermal Power Stations - A Case Study – 2002. – Режим доступа: [www/ URL](http://www/).
314. N.Kadem, A.Tchiftchibachian, R.Borghini. Eulerian model for irrigation gun water jet. Centre d'Etudes du Mashinisme Agricole, Université de Bretagne-Sud – IUT 56100 Lorient, France. 2003. – P. 1 – 6.

315. NIST Special Publication 1041. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). User's Guide. – NIST, 2005. / CFAST – Руководство пользователя.

316. Nukiyama S.T., Tanasava Y. Trans. Soc. Mech. Eng. Japan, 1938, 4, 86 – 138.

317. Numerical Modeling of Hydrogen Release, Mixture and Dispersion in Atmosphere / E.A. Granovskiy, V.A. Lyfar, Yu. A. Skob, M.L. Ugryumov // Abstracts Book and CD-ROM Proceedings the International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – 10 p. (ICHS Paper No. 110021).

318. NUREG-1824. Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications. Volume 5: Consolidated Fire Growth and Smoke Transport Model (CFAST). NUREG/ERPI, 2007 / Tom 5: CFAST.

319. Presented at. The Chemical Engineers' Resource Page, 1442 Goswick Ridge Road, Midlothian, VA 23114, 2008 – Режим доступа : [www/ URL: http://www.cheresources.com/cementkiln.shtml](http://www.cheresources.com/cementkiln.shtml). – Загл. с экрана

320. Radcliffe A. Proc. Inst. Mech. Eng., 1955, 169, 3, 93.

321. Sohngen E., Grigull U., Forschung, 1951, 17, 77.

322. Spray Nozzles. Wilson Spray Nozzle - Singapore. - Режим доступа: [www/ URL: http://www.wilsonspraynozzle.sg/Spray-nozzles.htm](http://www.wilsonspraynozzle.sg/Spray-nozzles.htm). - Загл. с экрана.

323. Steve Joubert Effective Dust Control on tailing dams. - Режим доступа : [www/ URL: http://www.floppysprinkler.com /component/option, com_frontpage /Itemid,1/](http://www.floppysprinkler.com/component/option,com_frontpage/Itemid,1/) – Загл. с экрана.

324. Taylor G.I., Quart J. Mech. Appl. Math., 1950, 111, 129.

325. The Role of Chemicals in Controlling Coal Dust Emissions By Christopher F. Blazek, VP Marketing, Benetech Inc. Presented at the American Coal Council PRB Coal Use: Risk Management Strategies & Tactics Course June 25, 26, 2003, Hyatt Regency Dearborn, Michigan. - Режим доступа : [www/ URL:http://www.benetechusa.com/pdf/article/ChemDustSuppressPaperWeb.pdf](http://www.benetechusa.com/pdf/article/ChemDustSuppressPaperWeb.pdf). – Загл. с экрана.

326. Vandoormaal J.P., Raithby G.D. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows // Numer. Heat Transfer. – 1984. – No. 7. – P. 147 – 163.

327. ПБ 05-618-03. Правила безопасности в угольных шахтах. – Сер. 5. – Вып. 11. – М. : НТЦ «Промышленная безопасность», 2003. – 296 с.

328. Bundesrepublik Deutschland Patent № 10056213 A1, Int. Cl. A62C 3/02, Brandtunnel-Komplettsystem Wald/Flächen/Häuser/Tunnel, 13.11.2000.

329. 9000 Series Water Spray Nozzles. (Open Head-Fixed System). GUARDIAN FIRE EQUIPMENT, INC. – Режим доступа: [www/ URL: http://www.guardianfire.com/products/sprinklertest/spraynozzles.htm](http://www.guardianfire.com/products/sprinklertest/spraynozzles.htm). – Загл. с экрана.

330. РД 03-409-01 «Методика оценки аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (утв. пост. Госгортехнадзора России от 26.06.2001 г. № 25) [Текст]. – Сер. 27. – Вып. 2. – М. : НТЦ «Промышленная безопасность», 2001. – 208 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.	3
1. АНАЛИЗ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ, ПРИ РЕШЕНИИ КОТОРЫХ МОГУТ ИСПОЛЬЗОВАТЬСЯ МНОГОФАЗНЫЕ ДИСПЕРСНЫЕ СТРУКТУРЫ.	4
1.1. Развитие концептуальных основ управления экологической безопасностью.	4
1.2. Состояние проблемы создания системы управления экологической безопасностью экономичными и высокопроизводительными методами при возникновении лесных и степных пожаров.	10
1.3. Состояние проблемы управления экологической безопасностью при проведении работ в угольных шахтах.	13
1.3.1. Существующие методы пылеподавления.	14
1.3.2. Мероприятия, препятствующие образованию пыли и пылевого облака.	18
1.3.3. Мероприятия по локализации взрывов пыли.	19
1.3.4. Причины и механизм возникновения шахтных пожаров.	21
1.4. Состояние проблемы управления экологической безопасностью при проведении погрузочных и разгрузочных работ в морских портах.	24
2. МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ МНОГОФАЗНЫЕ ДИСПЕРСНЫЕ СТРУКТУРЫ.	28
2.1. Системный подход к разработке систем управления экологической безопасностью, использующих многофазные дисперсные структуры.	28
2.2. Система управления экологической безопасностью, использующая многофазные дисперсные структуры, как сложная организационно-технологическая система.	29
2.3. Системный подход как условие повышения эффективности систем управления экологической безопасностью, использующих многофазные дисперсные структуры	35
2.4. Формирование концепции создания модели управления экологической безопасностью, использующей многофазные дисперсные структуры.	36
2.5. Методологическая схема решения поставленных задач исследования.	37

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАНОВКИ МНОГОФАЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУР, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ.	39
3.1. Использование многофазных дисперсных структур при обеспечении экологической и техногенной безопасности.	39
3.2. Численная модель процесса постановки мелкодисперсных водяных завес	41
3.2.1. Физико-математическая постановка задачи.	41
3.2.2. Модель газовой фазы.	42
3.2.3. Модель дисперсной фазы.	44
3.2.4. Модель межфазного взаимодействия.	47
3.2.5. Расчетная область и расчетная сетка.	48
3.3. Исследование процесса постановки мелкодисперсной водяной завесы численным методом.	50
3.3.1. Метод численного интегрирования уравнений газовой фазы.	50
3.3.2. Обеспечение устойчивости, сходимости и точности численного решения.	54
3.3.3. Метод численного интегрирования уравнений дисперсной фазы.	55
3.4. Результаты численного моделирования процесса постановки мелкодисперсной водяной завесы	56
3.5. Расчетная область и расчетная сетка для условий транспортирования мелкодисперсных капель в зону возникновения опасности природного или техногенного характера различного генезиса.	63
3.6. Результаты численного моделирования для условий транспортирования мелкодисперсных капель в зону возникновения пылевого загрязнения.	66
3.6.1. Орошение брандспойтом.	66
3.6.2. Орошение атомайзером.	73
 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕЛКОКАПЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ОПАСНОСТИ, ВЫЗВАННОЙ ПРИРОДНЫМИ ИЛИ ТЕХНОГЕННЫМИ ФАКТОРАМИ.	84
4.1. Аналитический обзор математических методов моделирования газодинамических процессов, используемых при разработке систем управления экологической безопасностью.	85
4.2. Математическая модель экологических процессов в атмосфере.	90

4.2.1. Учет распыления капель (частиц пыли твердых фракций) .	94
4.2.2. Учет влияния аэродинамического сопротивления капель (частиц пыли твердых фракций) на параметры движения газовой смеси.	94
4.2.3. Учет влияния тепловыделения вследствие фазового перехода при кипении капель (химической реакции горения частиц пыли твердых фракций) на параметры движения газовой смеси.	95
4.3. Метод представления и численное решение задач смешения газов в атмосфере.	97
4.3. Расчет распада разрыва.	102
4.5. Разработка объектно-ориентированной информационной технологии и компьютерной системы инженерного анализа газодинамических процессов смешения газов в атмосфере. . .	106
4.6. Моделирование системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной степными или лесными пожарами.	111
4.6.1. Моделирование воздействия взрыва объемного шлангового заряда на лесной фитоценоз и растительный покров.	111
4.6.2. Моделирование формирования области обрыва лесогорючих материалов (ЛГМ) при взрыве топливовоздушных зарядов в лесном фитоценозе.	116
4.7. Моделирование системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной взрывом метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт.	121
4.8. Моделирование системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной запылением воздушной среды.	124
5. УСТРОЙСТВА, СОЗДАЮЩИЕ МНОГОФАЗНЫЕ ДИСПЕРСНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ.	126
5.1. Устройства типа «атомайзер» для систем управления экологической безопасностью.	126
5.2. Однофазные струйно-центробежные распылители для систем управления экологической безопасностью.	128
5.3. Некоторые характеристики однофазного струйно-центробежного распылителя для систем управления	

экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур.	131
5.4. Водовоздушные эжекторные распылители для систем управления экологической безопасностью.	136
5.5. Некоторые характеристики водовоздушных эжекторных распылителей для систем управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур.	143
5.6. Двухфазный распылитель для систем управления экологической безопасностью.	147
5.7. Некоторые характеристики двухфазных распылителей для систем управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур.	151
6. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ МНОГОФАЗНЫЕ ДИСПЕРСНЫЕ СТРУКТУРЫ.	152
6.1. Метод прогнозирования последствий и модель автоматизированной системы управления экологической безопасностью опасного производства при возникновении аварийных ситуаций.	152
6.1.1. Постановка задачи и метод ее решения.	153
6.1.2. Модель автоматизированной системы управления экологической безопасности опасного производства при возникновении аварийных ситуаций.	155
6.2. Разработка и внедрение системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной степными или лесными пожарами.	160
6.3. Разработка и внедрение системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной взрывом метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт.	162
6.4. Разработка и внедрение системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при наличии опасности, вызванной запылением воздушной среды.	165

Наукове видання

Вамболь Сергій Олександрович

**СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ,
ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬ БАГАТОФАЗНІ ДИСПЕРСНІ СТРУКТУРИ**

(Російською мовою)

Редактор Л.О. Кузьменко

Зв. план, 2013

Підписано до друку 20.02.2013

Формат 60x84 1/16. Папір офс. №2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 11,3. Обл.-вид. арк. 12,75. Наклад 300 пр.

Замовлення 46. Ціна вільна

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
[http:// www.khai.edu](http://www.khai.edu)

Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001