

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. № & i



Сечин Александр Иванович

**ОПТИМИЗАЦИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ СУШКИ
АЭРОЗОЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОЖАРО- И ВЗРЫВООПАСНЫХ
СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ**

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Томск - 2003

Актуальность работы. Обширный ряд современных отраслей промышленности применяет разнообразные процессы тепло- и массопереноса (ТМП), оптимальное проведение которых играет существенную роль в обеспечении качества готовой продукции. Составной частью многих химико-фармацевтических производств (ХФП) является обработка дисперсных сред, характеризующихся значительной пожаровзрывоопасностью, что требует принятия мер безопасности и это увеличивает себестоимость выпускаемой продукции. Внедрение систем автоматизированного проектирования позволяет проанализировать множество вариантов проведения процессов ТМП и выбрать оптимальное с точки зрения безопасности решение. Для использования математических моделей ТМП в совокупности с базами данных по теплофизическим и диффузионным характеристикам перерабатываемых дисперсных сред необходимы и экспериментальные данные. Широкое применение активных гидродинамических режимов сушки, позволяющихкратно увеличивать производительность аппаратов, сдерживается отсутствием данных о взрывоопасноеTM перерабатываемых веществ и материалов.

Сушка является конечной стадией производства большинства готовых продуктов и полупродуктов. Часто их необходимо накапливать или передавать на следующую стадию обработки в сухом виде, предпочтительнее пневмотранспортом.

В процессе эксплуатации пневмотранспорта и ряда сушильных установок в полостях аппаратов образуются взрывоопасные концентрации паро- и пылевоздушных смесей с одновременным накоплением зарядов статического электричества. Эти факторы явились причиной того, что наметившаяся тенденция к интенсификации тепло- и массообменных процессов в промышленности с использованием высокоактивных режимов и аппаратов в настоящее время несколько снизилась. На ряде промышленных предприятий участились случаи взрывов, загорания сушильных установок и вспомогательного оборудования. Нередко вопросы проектирования, строительства и эксплуатации нового сушильного оборудования решаются в отрыве от задачи обеспечения пожаровзрывобезопасности технологического процесса.

Большинство продуктов даже не органического происхождения, поступающих на сушку, являются взрывоопасными в присутствии кислорода воздуха. Кроме того, нередко продукты содержат органические растворители. Все это предъявляет особые требования пожаровзрывобезопасности к сушильному оборудованию, ограничивая применение интенсивных процессов сушки.

Большое народно-хозяйственное значение процессов сушки и транспортировки, важность изложенного комплекса задач для обеспечения пожаровзрывобезопасности предопределяет актуальность разработки теоретического и экспериментального обоснования интенсификации промышленных технологий при учете физико-химических тепло- и массопереноса в технологических процессах.

Об актуальности решения этих вопросов свидетельствуют федеральная программа по развитию фармацевтической промышленности и лекарственного обеспечения Российской Федерации (1994-1996 гг.), постановление Правительства Российской Федерации № 1122 от 20.11.94 г. "О мерах по увеличению производства лекарственных средств и современной медицинской техники на 1995-1997 гг." и Федеральная целевая научно-техническая программа "Развитие медицинской промышленности на 1998-2000 гг. и на период до 2005 г.", в свете которых выполнена работа.

Целью работы является оптимизация массообменных процессов сушки аэрозолей взрывоопасных веществ на основе анализа их пожаро- и взрывоопасных свойств. Для ее достижения ставятся и решаются следующие задачи:

1. анализ пожаро- и взрывоопасных свойств веществ и выбор факторов, ведущих к характерным авариям для их предупреждения в условиях физической переработки материала;
2. развитие представлений о факторах, влияющих на начальную стадию развития аварийных ситуаций на основе их исследования применительно к технологическому оборудованию;
3. определение критерия опасности для рассматриваемых систем;
4. разработка и оптимизация массообменных процессов сушки аэрозолей для реконструкции действующего технологического оборудования с повышенными техническими характеристиками;
5. создание экспериментальных установок для изучения начальных стадий развития аварийных ситуаций и выбор значимых факторов на основе исследований и испытаний в натуральных условиях;
6. теоретическое и экспериментальное обоснование разработки основ проектирования и передача ее в организации отрасли, а также исходных данных на проектирование и создание технологических процессов с пожаровзрывобезопасными характеристиками.

Научная новизна.

1. Установлено, что пограничное состояние гетерогенной системы определяется следующими параметрами: величиной критических условий распространения пламени, концентрацией горючего, характеристическим размером полости накапливающей статическое электричество, представленной как радиус вписанной окружности, давлением в рассматриваемой системе, периодом индукции теплового воспламенения, температурой воспламенения аэрозвеси.
2. Разработан метод расчета критических условий распространения пламени в гетерогенных системах, образующихся в оборудовании при ведении технологических процессов.
3. Установлен фактор влияния температуры и определен параметр «температура воспламенения аэрозвесей», необходимый при анализе пожаро- и взрывоопасных свойств пылевых взвесей.
4. Установлено, что парогазовые и газодисперсные системы при пониженных давлениях представляют еще большую пожаро- и взрывоопасность, чем при нормальных условиях.

Практическое значение выполненных исследований.

1. Разработан метод интенсификации процесса сушки взрывоопасных продуктов, обеспечивающий снижение пожаровзрывоопасности технологии, заключающийся в учете линейных размеров технологического оборудования при проектировании и при его реконструкции.
2. Разработан метод проектирования и создания технологических процессов для переработки взрывоопасных веществ без использования химически инертных газов, прошедший комплекс испытаний в натуральных условиях с положительным результатом и внедренный в практику работы предприятий и организаций.
3. Разработанная методика расчета позволила установить нормы технологического режима, внести изменения в регламенты производства ряда лекарственных субстанций, представляющих собой взрывоопасные материалы, увеличить

производительность путем замены полочной сушилки на аэрофонтанную, что позволило сократить время сушки продукта с 10 часов до 1 часа и осуществлять вышеуказанные процессы не в инертной атмосфере, а в воздушном теплоносителе.

4. Предложены технологические регламенты ведения процесса сушки левомицетина, оксациллина и изоксазолкарбоновой кислоты в активном гидродинамическом режиме с пневмотранспортом сухого продукта.
5. Разработаны установка и методика экспериментального определения предельных условий распространения пламени в аэрозвеси с учетом температуры инициирующего источника зажигания, позволяющая определять его критическую температуру, а также проводить исследования при пониженных давлениях. Разработана методика определения температуры воспламенения аэрозвеси, позволяющая прогнозировать условия пожаро- и взрывобезопасности при использовании пылеобразующих веществ и материалов.
6. Разработана методика определения критерия опасности и расчета критических условий распространения пламени в гетерогенных системах, используемых в производственном оборудовании при ведении технологических процессов.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментальных и теоретических исследований и, разработанные автором, методики изучения критических условий распространения пламени по модельным системам.
2. Результаты исследований, показывающие, что испытуемое вещество при пониженных давлениях, представляет еще большую опасность, чем при нормальных условиях.
3. Методика расчета критических условий распространения пламени в гетерогенных системах, использующихся в оборудовании при ведении технологических процессов.
4. Метод оптимизации массообменных процессов сушки аэрозолей на основе анализа пожаро- и взрывоопасных свойств веществ.
5. Метод интенсификации процесса сушки взрывоопасных продуктов в условиях снижающих пожаровзрывоопасность.
6. Новый способ сушки лекарственных субстанций, позволяющий сократить время сушки, технологический регламент ведения процесса сушки в активном гидродинамическом режиме с пневмотранспортом сухого продукта.
7. Установка и методика экспериментального определения предельных условий распространения пламени в аэрозвеси с учетом температуры инициирующего источника зажигания, позволяющая определять эту критическую температуру и проводить исследования при пониженных давлениях.

Реализация результатов исследования.

1. Основные результаты исследования составили основу Нормативно-технических материалов Минмедпрома «Пожаро- и взрывоопасность лекарственных препаратов их полупродуктов, сырья и смесей, применяемых в медицинской промышленности» [6].
2. Результаты диссертационной работы внедрены в технологии получения ряда фармацевтических субстанций на Новокузнецком ОЛЮ «Органика», что улучшило технико-экономические показатели производств и повысило доход на сумму 2640 тыс. руб. в год.
3. Материалы диссертации использованы в учебном процессе: в курсе лекций по экологии и безопасности жизнедеятельности, при проведении лабораторно-

практических занятий, в научно-исследовательской работе студентов химико-технологических и теплоэнергетических специальностей, в дипломном проектировании.

Апробация работы. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований обсуждались и получили признание на следующих научных форумах: Всесоюзной научно-практической конференции "Повышение надежности и эффективности автоматической пожарной защиты объектов"; (шифр СФ89-ОТ53)/ г. Севастополь, 1989г.; 8-10-го отраслевого совещания "Проблемы и перспективы развития ПО ТНХК" /г. Томск, 1994г., 1995г., 1996г.; Пятой международной научной конференции «Пожаровзрывобезопасность производственных процессов в металлургии»/г. Москва, МИСиС, 1996 г. Российской научной конференции, "Субъекты Российской Федерации в условиях реформ" /г. Томск. 1995 г.; 13-й Всероссийской научно-практической конференции «Пожарная безопасность-95». /г. Балашиха. ВНИИГЮ. 1995 г.; Третьем сибирском конгрессе по прикладной и индустриальной математике "ИНПРИМ-98". /г. Новосибирск, Институт математики СО РАН, 1998 г.; 1-4-ом Международном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоение недр» /г. Томск, 1997 г., 1998 г., 1999 г. 2000 г.; Третьей Всероссийской научно-практической конференции "Проблемы безопасности в природных и технических системах" "Безопасность-98"/г. Иркутск, 1998 г.; Четвертой областной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" /г. Томск, 1998г.; The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS'99/Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 1999.; 1-8-й Всероссийской научно-технической конференции "Энергетика: экология, надежность, безопасность"/ г. Томск, 1994 г., 1996 г., 1997 г., 1998 г., 1999 г., 2000 г. 2001 г., 2002 г.; Седьмой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»/ г. Томск, 2001 г.; Научно-практической конференции «Химия и технология лекарственных препаратов и полупродуктов»./г. Новокузнецк. 2002 г. 1 и 2-й научно-практической конференции «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий»./г. Томск. 2000 г., 2002 г.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 98 печатных работ, получено два авторских свидетельства РФ. Основные научно-методические результаты работы обобщены в монографиях [1,2].

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 281 страницах машинописного текста; состоит из введения, шести глав и выводов, включая 13 таблиц и 53 иллюстрации, списка литературы из 282 источников отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы и ставятся задачи исследования, излагаются основные положения работы, выносимые на защиту, даются сведения, характеризующие научную новизну и практическую значимость результатов исследований, их апробацию и публикацию в научно-технической литературе.

В первой главе проведен анализ характера и причин аварий в химической промышленности. Показано, что в последнее десятилетие большинство их (около 95 %) связано с взрывами различных химических веществ: 54 % в аппаратуре, 46 % в производственных зданиях и на открытых технологических установках. Однако это соотношение не одинаково в различных подотраслях и изменяется в зависимости от характера производства.

Из литературных источников анализирующих аварии следует, что основное их количество 81 % связано с ведением химико-технологических процессов, 13 % с подготовкой оборудования к ремонту, ремонтными работами или приемом оборудования из ремонта и 6 % - по другим причинам.

Следует отметить, что аварии в химической промышленности, как правило, являются следствием несовершенства отдельных технических средств, недостатков проекта, а так же ошибочных действий производственного персонала. Анализ аварий происшедших в химической промышленности показывает, что число сочетаний факторов и последовательностей различных взаимосвязанных локальных событий, приводящих к разрушительным взрывам, велико. Такой анализ в сочетании с математической обработкой статистических данных позволил выделить наиболее характерные опасности химических производств.

Из анализа аварий в химических производствах, происшедших за рубежом, сделан вывод о том, что в отечественной промышленности, в основном, те же причины вызывают наиболее крупные аварии. Устойчивая, безаварийная и безопасная работа химического производства зависит от многих факторов, а именно: физико-химических свойств сырья, полупродуктов и продуктов; характера самого процесса; конструкции и надежности эксплуатируемого оборудования; наличия контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации; эффективности технологических мероприятий и средств противаварийной защиты и т.д.

Таким образом, основы безопасности современного химического производства должны обеспечиваться еще на стадии исследовательских работ, при разработке технологического процесса, конструкций оборудования, контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации, а также при разработке проекта во всех его основных частях.

Так же представлен аналитический обзор состояния вопроса в области обеспечения взрывобезопасности процесса сушки и основные направления развития сушильной техники в химико-фармацевтической промышленности, дана классификация продуктов химико-фармацевтической промышленности как объектов сушки, представлен обзор методов сушки и используемого технологического оборудования, рассмотрена ножаро- и взрывоопасность сушильных установок, рассмотрена методология безопасного ведения процесса сушки. Определены цели и сформулированы направления исследований.

Разработка инженерного метода расчета критических условий распространения пламени в гибридных системах, представляет большое практическое значение, так как позволяет еще на стадии проектирования выявить степень опасности обрабатываемой системы в технологическом оборудовании. Полученная совокупность знаний о поведении модельных систем, дает возможность разработки расчетной методики, оптимизации надежности и безопасности химико-технологических систем.

Проведя статистический анализ ряда гибридных систем, было установлено, что область, характеризующая пограничное состояние системы, можно описать функцией

$$D_0 = f(k_i, r_k, C_i, P_i, \tau, T_g), \quad (1)$$

приняв D_0 за критерий опасности рассматриваемой системы.

где k_i - величина критических условий распространения пламени в системе i -го компонента; C_i - концентрация горючего i -го компонента в системе; r_k - характеристический размер представленный как радиус вписанной окружности; P_i - давление в рассматриваемой системе; τ - время, в течение которого достигается скорость,

обеспечивающая тепловое воспламенение, т.е. период индукции теплового воспламенения; $T_{\text{в}}$ - температура воспламенения аэрозвеси.

Вторая глава посвящена рассмотрению особенностей горения газовых систем, как составляющей функции До- Анализируются исследования чувствительности к воспламенению газовых систем в технологических процессах с давлениями до 101 кПа, а также факторов, влияющих на чувствительность среды к инициации и развитию аварийной ситуации в технологических процессах.

С целью разработки соответствующего методологического подхода к повышению безопасности технологических процессов и проведения обследования по вопросам пожаровзрывобезопасности были проанализированы литературные данные по влиянию факторов, действующих при эксплуатации технологических аппаратов на процессы воспламенения и распространения пламени по рабочим объемам.

Пожалуй, самым специфичным условием эксплуатации технологического оборудования в химических производствах является то, что присутствуют стадии, использующие пониженные давления не только в газовых системах, но и в паровых средах. В этом случае актуальность вопросов обеспечения пожаро- и взрывобезопасности таких технологических процессов существенно возрастает.

В свете имеющихся представлений о сущности явления пределов распространения пламени, изучение роли ряда факторов, в первую очередь давления, компонентного состава, может иметь принципиальное значение для формирования правильных представлений о сущности пределов распространения пламени в рассматриваемых системах.

Анализ литературных данных и представлений о пределах распространения пламени, а также их развитие по мере получения новых результатов показывают, что для выявления закономерностей пределов необходимы комплексные исследования.

Исследователями Л.К. Парфеновым и В.Ф. Паниным было установлено, что для модельной системы $\text{H}_2\text{-O}_2$, (рис. 1), при увеличении P нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) сначала уменьшается, затем возрастает.

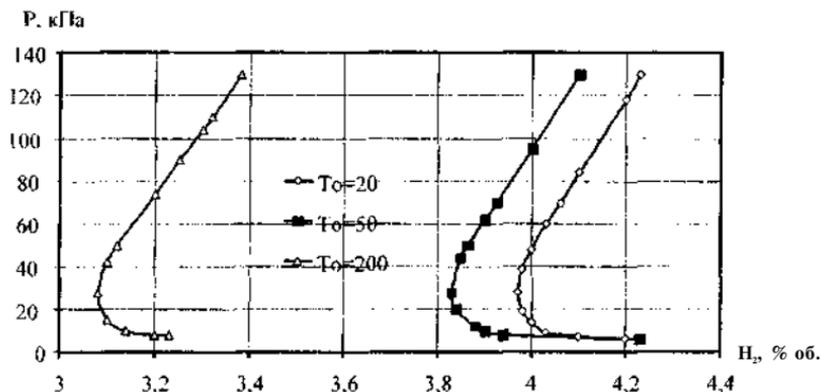
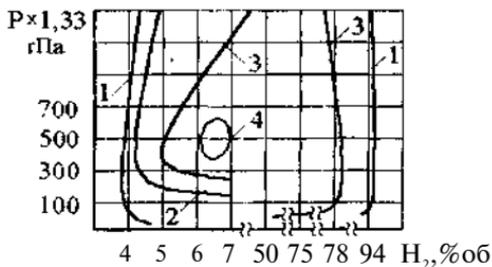


Рис. 1. Зависимость предельных условий чувствительности смеси $\text{H}_2\text{-O}_2$ к иницирующему воздействию источника зажигания при изменении давления и температуры

Имеет место второй предел распространения пламени по Р - первое опытное подтверждение вывода теории конвективных пределов (Л.А. Ловачев, А.Н. Баратов). В расчете на 100 °С уменьшение нижнего предела H_2 составляет - 12 %. Также ими были исследованы модельные $H_2-O_2-N_2$ системы с $[O_2] = \text{Const}$. Было установлено, что при уменьшении Р область горения модельной системы расширяется, затем сужается до смыкания нижнего и верхнего предела (рис.2). При $[O_2] < 9-10\%$ об область второго предела так же расширяется до смыкания нижнего и верхнего



пределов, уменьшение нижнего предела при повышении T_0 не линейно. При $[O_2] < 4,8\%$ об. горение отсутствует.

Рис. 2. Зависимость пределов распространения пламени в системе $H_2-O_2-N_2$ от давления и содержания кислорода: 1 - H_2-O_2 ; 2 - 6 % об O_2 ; 3 - 5,1 % об O_2 ; 4 - 4,8 % об O_2

Из приведенных выше экспериментальных результатов работы для развития представления о пределах распространения пламени в газах определенное значение имеют следующие выводы:

1. распространение пламени - это распространение процесса самовоспламенения, при котором имеют место те же химические превращения во фронте пламени, в объеме реагирующей смеси газов. Химические превращения при распространении пламени осуществляются за счет переноса энергии, движения, массы, поэтому эти процессы должны учитываться при анализе наблюдаемых эффектов;
2. многие явления, характерные для распространения пламени (в том числе наличие двух пределов распространения пламени в системе по давлению), могут быть объяснены с учетом влияния различных факторов на кинетику элементарных процессов химического превращения.

Несмотря на значительное количество работ, в настоящее время еще не произведена достаточно полная оценка влияния различных факторов на пределы воспламенения. Некоторые авторы своими работами доказывают совсем противоречивые результаты. Поэтому для технологических процессов, в которых обращаются взрывоопасные смеси, необходимо проведение экспериментальных исследований максимально приближенных к конкретным условиям эксплуатации технологических аппаратов.

Опираясь на вышеизложенное, было сделано предположение, что наблюдаемый эффект второго предела по давлению для водород-кислородных смесей, представленный выше, можно ожидать как и в парогазовых, так и в пылегазовых смесях.

Следовательно, учитывая специфичность условий эксплуатации технологического оборудования в химических производствах: присутствие технологических стадий, использующих пониженные давления не только в газовых системах, но и в паровых и дисперсных средах, актуальность вопросов обеспечения пожаро- и взрывобезопасности таких технологических процессов существенно возрастает.

В третьей главе. основываясь на специфичности условий эксплуатации технологического оборудования в химических производствах, литературном обзоре, экспериментальных исследованиях и в свете развития представлений об изучении модельных парогазовых систем, сформулированных в предыдущих главах, была

разработана методика и установка для определения критических условий распространения пламени по парогазовым смесям как при нормальных условиях, так и при пониженных давлениях (рис. 3).

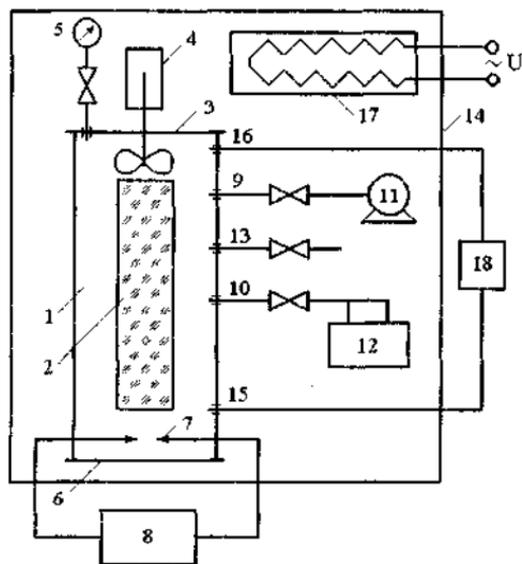


Рис. 3. Установка по исследованию критических условий распространения пламени в газо- и паро-воздушных смесях

Экспериментальная установка по исследованию критических условий распространения пламени в парогазовых смесях состоит из герметичного реакционного сосуда 1, представляющего собой медный цилиндр высотой 530 мм и внутренним диаметром 80 мм со смотровым окном 2 по всей высоте сосуда. Сосуд сверху закрывается крышкой 3, на которой установлены вентилятор 4 для перемешивания реакционной массы и вакуумметр 5. Он также имеет жестко закрепленную нижнюю крышку 6 и электроды зажигания 7, установленные внутри сосуда в нижней его части и соединенные проводами с зажигающим устройством 8. Реакционный сосуд сообщен трубопроводами 9, 10 с вакуум-насосом 11 и испарителем 12 соответственно, а также имеет воздуховод 13, связанный с объемом термощафа 14. На стенках реакционного сосуда расположены датчики регистрации скачка температуры 15, 16, подающие сигнал на блок регистрации 18. Реакционный сосуд находится в термощафу 14, снабженном нагревателем 17.

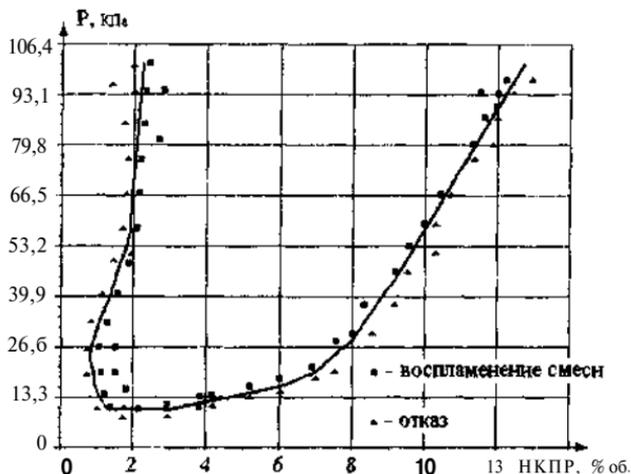
Контроль за повышением давления осуществляется с помощью вакуумметра 5. Реакционный сосуд считают герметичным и пригодным к работе, если повышение давления за счет натечек не превышает 10 Па за 30 минут. Затем в реакционный сосуд подают горячий пар из испарителя 12 в расчетном объеме. После этого через воздуховод 13 подают воздух (окислитель). Контроль за количеством поданного горючего компонента и воздуха осуществляется вакуумметром 5. Производят перемешивание компонентов смеси в реакционном сосуде с помощью вентилятора 4 в течение 0,2 минуты, затем выключают вентилятор 4, перекрывают вакуумметр 5 и поджигают смесь с помощью зажигающего устройства 8 и электродов 7. Наблюдение за пламенем проводят визуально через смотровое окно 2. Скорость распространения пламени измеряют датчиками регистрации скачка температуры 15, 16.

Разработанная установка решает задачи определения критических условий распространения пламени при давлениях от 0 до 0,3 МПа и определение нормальной скорости распространения пламени. Апробация методики и установки проводилась на смеси паров изопропилового и изобутилового спиртов с воздухом при нормальных

условиях. Исследования показали полную сходимость полученных результатов с данными, имеющимися в литературе.

Так же на разработанной установке и методике для изучения критических условий распространения пламени в модельных парогазовых системах были проведены исследования других веществ: ацетона, метанола, п-ксилола, толуола и дихлорэтана. Эти исследования представлены в табл. 1.

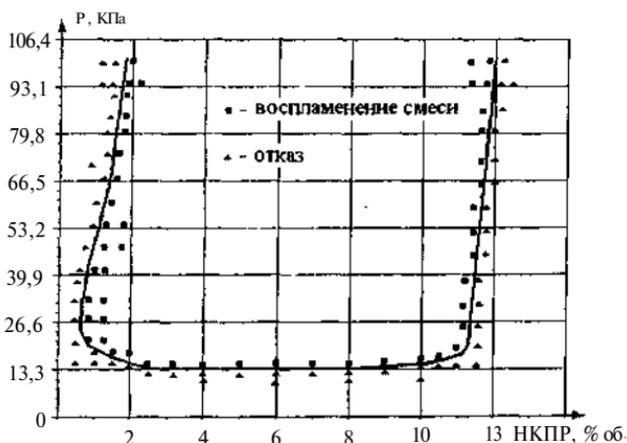
Результаты, представленные на Рис. 4 и Рис. 5, получены при условиях понижения давления в реакционной камере. Они показывают, что нижний предел распространения пламени в парогазовых смесях определяется (Рис. 4) при концентрации паров растворителя 0,95 % об. и 6,2 % об. для верхнего предела. Хотя для этих характеристик при определении предельных условий горения по методике, утвержденной Государственным стандартом, величина нижнего и верхнего пределов распространения пламени



составляет 2 и 12 % об. соответственно. При этом необходимо учитывать, что представленные результаты получены при нормальных условиях.

Рис. 4. Зависимость критических условий воспламенения паровоздушной смеси изонропилового спирта от давления в реакционной камере и концентрации горючего компонента

нижний предел распространения пламени в парогазовых смесях изобутилового спирта определяется при концентрации паров растворителя 0,7 % об. и 11,2 % об. для верхнего предела.



Необходимо отметить, что характер кривой показывает на существование второго предела распространения пламени по давлению для паровоздушных смесей.

Рис. 5. Зависимость критических условий воспламенения паровоздушной смеси изобутилового спирта от давления в реакционной камере и концентрации горючего компонента

Этот эффект известен своим проявлением в водород-кислородо-азотистых газовых смесях и обозначен как 2-й предел распространения пламени по давлению, в отличие от 2-го предела самовоспламенения, изучение которого в 30 - 50-х годах прошлого столетия дало импульс к разработке теории цепных реакций. Утверждение существования второго предела для паро-воздушных смесей устанавливает значительное уменьшение нижнего концентрационного предела распространения пламени.

Таблица 1. Результаты исследований критических условий распространения пламени в паро-воздушных системах

№ п/п	Наименование паро-воздушной системы	Воспламенение системы, % об	
		нормальные условия	пониженное давление
1.	Ацетон	2,2	1,9
2.	Метиловый спирт	6,0	1,0
3.	П-ксилол	1,0	0,1
4.	Толуол	1,3	0,34
5.	Дихлорэтан	6,2	5,9

Для прогноза пожаровзрывоопасности смесей горючих веществ был рассмотрен принцип аддитивности, реализуемый формулой Ле Шателье (2) (НКПР для смесей горючих газовых систем):

$$\text{НКПР} = 100 \cdot \frac{c_i}{g_i}; \quad (2)$$

где g_i - содержание i -го горючего компонента системы ($\sum g_i = 100$), % об.; c_i - НКПР i -го компонента системы, % об.

Проведенные исследования показали применимость его и для исследованных горючих парогазовых модельных систем. На Рис. 6 представлены результаты исследований, показывающие, что выше прямой 1 располагается область нижних предельных значений воспламенения модельной системы изобутиловый спирт - изопропиловый спирт - воздух при нормальных условиях.

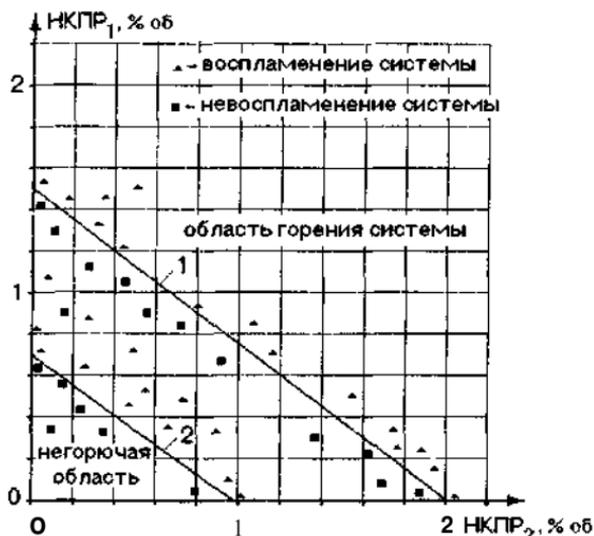


Рис. 6. Нижние предельные условия зажигания модельной системы изобутиловый спирт - изопропиловый спирт: НКПР₁ - изобутиловый спирт, НКПР₂ - изопропиловый спирт; 1 - при нормальных условиях, 2 - при пониженных давлениях в реакционной камере

Ниже прямой 1 располагается область не воспламенения системы при нормальных условиях. Выше прямой 2 располагается область нижних предельных значений зажигания модельной

системы изобутиловый спирт-изопропиловый спирт - воздух при пониженных давлениях в реакционной камере. Ниже прямой 2 располагается область не воспламенения любой системы изобутиловый спирт - изопропиловый спирт - воздух даже при пониженных давлениях в реакционной камере.

На Рис. 7 представлены результаты исследований, показывающие, что ниже прямой 1 располагается область верхних предельных значений воспламенения модельной системы изобутиловый спирт - изопропиловый спирт - воздух при нормальных условиях. Выше прямой 1 располагается область не воспламенения системы, как при нормальных условиях, так и при пониженных давлениях в реакционной камере.

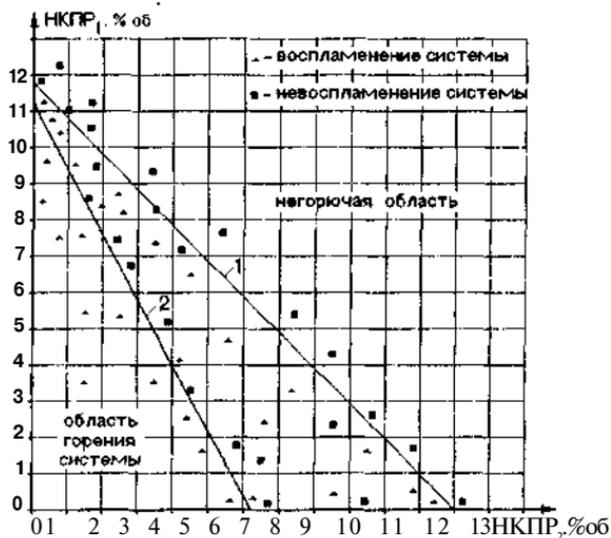


Рис. 7. Верхние предельные условия зажигания модельной системы изобутиловый спирт:

НКПР₁ - изобутиловый спирт, НКПР₂ - изопропиловый спирт; 1 - при нормальных условиях, 2 - при пониженных давлениях в реакционной камере

Ниже прямой 2 располагается область нижних предельных значений зажигания модельной системы изобутиловый спирт-изопропиловый спирт - воздух

при пониженных давлениях в реакционной камере. Выше прямой 2 располагается область не воспламенения системы изобутиловый спирт - изопропиловый спирт - воздух при пониженных давлениях в реакционной камере.

Легкость и простота графического определения опасной и безопасной зоны по отношению к зажиганию модельной системы и позволяет применять его в инженерных расчетах технологических процессов и аппаратов. Представленные результаты показывают, что испытуемое вещество при пониженных давлениях, представляет еще большую опасность, вследствие чего повышается риск использования технологических процессов, в которых при пониженных давлениях обращается данное вещество. Это значит, что технологическое оборудование и производственный регламент должны строиться с учетом этих условий. Из чего следует, что изменятся особенности конструкции и технологии, потенциальная опасность, основные факторы пожара и взрыва технологического оборудования, в котором присутствует это вещество и меры пожаровзрывопредотвращения.

В четвертой главе рассматриваются свойства пыли: форма, размеры, скорость осаждения, электризуемость и теплофизические характеристики. Приводится анализ горения пыли: условия самовозгорания и самовоспламенения, а так же вынужденное зажигание. Рассматриваются условия распространения пламени, а так же пожаро- и взрывоопасность промышленной пыли. Приводятся теоретические исследования в области повышения безопасной эксплуатации и интенсификации химико-техно-

гических процессов. На этом этапе определяются параметры движения частицы в пылегазовом потоке при перемещении его сверху вниз в нормальных условиях процесса. Так как большинство исходных данных для проектирования (условия ведения технологического процесса, систем безопасности, пожаро- и взрывоопасные характеристики) принимаются на основе физико-химических свойств веществ.

Учитывая силы, действующие на дисперсный поток (движение дисперсного потока рассматривается по цилиндрическому каналу), были приняты следующие приближения:

- Дисперсный поток рассматривается как двухкомпонентная механическая смесь, в которой не действуют фазовые переходы.
- Поток рассматривается в диапазоне концентраций 10-1500 г/м³ и давлений 10-101 кПа.
- В пределах элементарной ячейки поток рассматривается как осредненный с параметрами компонентов, удовлетворяющими разложению в ряд Тейлора.

Рассмотрим вертикальный прямоток сверху вниз. Именно в этих условиях наибольшая перспектива в создании пылегазовых облаков с равномерным распределением частиц в их объеме. Для составления уравнения движения дисперсного потока выделим элементарную ячейку, приходящуюся на дискретную

частицу $\Delta V_n = \frac{\pi d_p^3}{6\beta}$ с параметрами Δx , Δy , Δz , и рассмотрим силы, действующие в

направлении оси движения (Рис. 8).

На частицу в газовом потоке действуют силы тяжести, инерции, сопротивления потоку и силы взаимодействия между частицами и стенкой, между самими частицами. Алгебраическую сумму всех сил, обеспечивающих равновесие этого элемента, можно представить следующим образом:

$$G_x + I_x + \varphi_x + \Pi_x = 0, \quad (3)$$

где G_x - проекция сил тяжести на ось x ; I_x - проекция сил инерции на ось x . Силы инерции - это аэродинамические силы сопротивления движению частиц в воздухе, они равны изменению количества движения элементарной ячейки во времени, φ_x - проекция равнодействующих сил трения между частицами, и частицами и стенкой на ось x . Эту силу можно выразить в виде сил трения по каждой составляющей. Π_x - проекция равнодействующих сил сопротивления потока на ось x . Эта сила может быть представлена в виде изменения давления P в системе.

Расписывая каждую из составляющих, уравнение движения частицы в газовом потоке в дифференциальной форме записывается в следующем виде:

$$\frac{D\rho_T\beta V_T dx}{d\tau} = (\rho_T - \rho)g_x\beta - \frac{dP_T\beta}{dx} - \left(\frac{\partial\varphi_T\beta}{\partial x} + \frac{\partial\varphi_T\beta}{\partial y} + \frac{\partial\varphi_T\beta}{\partial z} \right)_x, \quad (4)$$

где D - диаметр камеры, м; ρ_T - плотность частицы, кг/м³; ρ - плотность среды, кг/м³; β - объемная концентрация, кг/м³; V_T - скорость частицы в потоке, м/с; τ - время движения частицы, с; g_x - проекция ускорения свободного падения на ось x ; P_T - давление в системе, Н/м².

Твердая частица, вводимая в газовый поток, приобретает скорость V_T в зависимости от величины скорости этого потока. В начале движения частиц в трубе эпюра распределения скоростей в камере по сечению будет носить крайне неравномерный характер, во-первых, из-за турбулентного характера струй газа; а во-вторых, из-за ускорения, которое приобретает каждая частица под действием силы

тяжести и которое для каждой частицы будет свое. Неравномерность распределения скорости по диаметру канала приводит к неравномерному распределению концентрации в трубе.

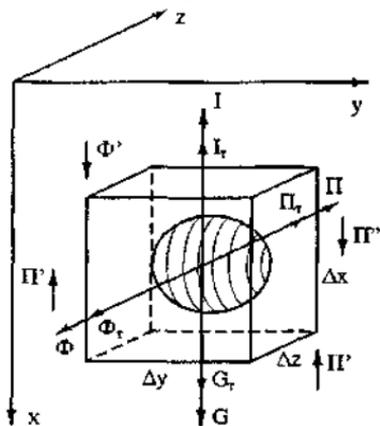


Рис. 8. Элементарная ячейка в потоке газозвеси

По истечению некоторого времени наступает стабилизация движения потока. Это объясняется тем, что на частицу действует аэродинамическая сила лобового сопротивления и в какой-то момент времени лобовое сопротивление, т.е. скорость торможения частицы, будет равна ускорению частицы, но направлена в противоположную сторону. Происходит как бы уравновешивание частицы, и она начинает падать за счет скорости «взвешивания» V_B и скорости,

приобретенной за счет потока V_n . (Скорость «взвешивания» можно определить двумя путями:

1. Из условия равенства массы частицы и аэродинамического сопротивления встречного потока воздуха следует:

$$V_B = \sqrt{\frac{4\Delta\rho_r d_p}{3\rho C_f}}, \quad (5)$$

где d_p - эквивалентный диаметр, м; C_f - коэффициент лобового сопротивления; V_B - скорость «взвешивания» частицы, м/с.

2. Скорость «взвешивания» шарообразной частицы определяется по формуле Стокса, а затем необходимо учесть коэффициент лобового сопротивления:

$$V_B = \frac{2r^2 g \rho}{9\eta}, \quad (6)$$

где r - радиус частицы, м; η - вязкость газа, $\text{пс}/\text{м}^2$; g - ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Вязкость определяется по формуле:

$$\eta = 0,3502 n_g m_g G_g l, \quad (7)$$

где n_g - число газовых молекул; m_g - масса газовых молекул воздуха, кг; G_g - скорость теплового движения, м/с; l - длина свободного пробега молекулы, м.

С учетом коэффициента лобового сопротивления можно записать общую формулу следующим образом:

$$V_B = \frac{2r^2 g \rho}{9\eta \sqrt{C_f}}, \quad (8)$$

Приведенные формулы (5, 8) справедливы для частиц шарообразной формы. Учитывая разнообразность частиц, вводят коэффициент формы f . Помимо формы частиц на скорость «взвешивания» оказывает влияние концентрация частиц в потоке и стенки камеры.

Таким образом, рассмотрев характер «взвешивающей» скорости и имея дифференциальное уравнение движения, необходимо решить это уравнение с целью

определения времени стабилизации движения. Это дает возможность рассчитать длину участка разгона частиц, а соответственно и область равномерного движения.

С этой целью проведем некоторые преобразования и сделаем допущения:

1. поскольку плотность твердых частиц много больше плотности воздуха ρ , то последней можно пренебречь, тогда:

$$G_{\tau} = \rho_{\tau} g \beta. \quad (9)$$

2. на поток газовой среды не действуют внешние силы, поэтому силу инерции можно представить как:

$$I_{\tau} = \beta \rho_{\tau} \frac{dV_{\tau}}{d\tau}. \quad (10)$$

3. сила взаимодействия между частицами определяется из зависимости:

$$\Phi_{\tau} = \rho_{\tau} \beta g \left(1 - \frac{V_{\text{онр}}^2}{V_{\text{в}}^2} \right), \quad (11)$$

где $V_{\text{онр}}$ - относительная предельная скорость, м/с. Т.е., скорость, при которой силы инерции равны нулю и начинается равномерное движение частицы, определяется экспериментально, в пределе равна «взвешивающей» скорости $V_{\text{в}}$.

4. сопротивление частиц в струе определяется как соотношение скоростей:

$$P_{\tau} = f \left(\frac{V_{\text{от}}}{V_{\text{в}}} \right),$$

где $V_{\text{от}}$ - относительная скорость потока, $V_{\text{от}} = V - V_{\tau}$, м/с.

Тогда:

$$\frac{\partial P_{\tau} \beta}{\partial x} = \beta \rho_{\tau} q \frac{V_{\text{от}}}{V_{\text{в}}^2}, \quad (12)$$

Приняв во внимание сделанные допущения и преобразования, уравнение движения дисперсного потока можно записать следующим образом:

$$\frac{dV_{\tau}}{d\tau} = q \frac{V_{\text{онр}}^2 - (V - V_{\tau})^2}{V_{\text{в}}^2}; \quad (13)$$

Полагая $V_{\text{онр}} \approx V_{\text{в}}$, получим:

$$V_{\tau} \frac{dV_{\tau}}{dL} = q \frac{V_{\text{в}}^2 - (V - V_{\tau})^2}{V_{\text{в}}^2}; \quad (14)$$

где τ - время разгона частицы, с; L - участок разгона частицы, м.

Разделяя переменные и полагая скорость частиц изменяющейся с изменением скорости потока, можно решить данное уравнение и определить основные гидромеханические характеристики потока.

1. Определяем время стабилизации τ , полагая $\tau_{\text{н}} = 0$:

$$\int_{V_{\text{он}}}^{V_{\text{ок}}} \frac{dV_{\tau}}{V_{\text{в}}^2 - V_{\text{от}}^2} = \frac{q}{V_{\text{в}}^2} \int_0^{\tau} d\tau,$$

где $V_{\text{он}}$ - относительная начальная скорость потока, м/с; $V_{\text{ок}}$ - относительно конечная скорость потока, м/с.

В итоге получаем:

$$\tau_T = \frac{V_B}{2q} \ln \left| \frac{V_{от} - V_B}{V_{от} + V_B} \right| \frac{V_{от}}{V_{ук}}. \quad (15)$$

Длина участка разгона определяется следующим образом:

$$L = \int_0^{\tau} V_T d\tau = V_{ок} \tau - \frac{V_B^2}{q} \ln \frac{\text{Sh} \gamma (V_{он}^2 - V_B^2)^{0,5}}{V_B^2}, \quad (16)$$

где γ - условное обозначение безразмерного комплекса;

$$\gamma = \frac{q\tau_T}{V_B} + 0,5 \ln \frac{V_{он} - V_B}{V_{он} + V_B}; \quad (17)$$

где

$$\gamma = 0,5(e^{\gamma} - e^{-\gamma}) \quad (18)$$

По истечению найденного участка разгона частица приобретает скорость $V_T = V_{ок} + V_B$ и начинает двигаться равномерно. Экспериментальная проверка, проведенная в области равномерного движения с помощью скоростной киносъемки, позволила установить следующее:

- основное направление движения частиц продольное, отдельные частицы участвуют в медленном поперечном движении;
- для осредненного по сечению потока значения скоростей частиц и воздуха справедливо $V_T = V_n + V_B$;
- наблюдается вращение частиц вокруг оси (в среднем 1800-5300 об/мин, при $V = 14,5 \cdot 27$ м/с). С повышением скорости движения потока увеличивается и скорость вращения частиц;
- концентрация взвешенных частиц по сечению выше у стенок, но с ростом диаметра неравномерность сглаживается;
- при увеличении скорости концентрация взвешенных частиц растет по оси потока.

Для более полного анализа картины, происходящей вне оси потока, используем зависимость, по которой определяем поле скоростей по сечению потока по мере удаления от сопла (рис. 9):

$$W = W_m \left[1 - \left(\frac{y}{R_{гп}} \right)^2 \right]^2. \quad (19)$$

Из него видно, что поле скоростей определяет конфигурацию распыляющего конуса. Во избежание лишних завихрений необходимо иметь распыляющий конус с подобным угловым створом.

Для равномерного распределения частиц в камере был использован метод импульсного распыления вещества из форсунки. Механизм процесса переноса в струях, связанный с передачей импульса окружающей среде и вовлечением ее в движение, позволяет нам использовать при исследовании основные закономерности развития турбулентных струй.

Схема прямоточной турбулентной струи изображена на рис.9. Участок 1, на котором сохраняется ядро постоянных скоростей, называется начальным участком струи. Участок 2, на котором ядро постоянных скоростей уже исчезает, а скорость изменяется незначительно, называется переходным участком. В практических расчетах часто пользуются упрощенной схемой струи и полагают длину переходного

участка равной нулю. Сечение, в котором скорость струи на оси начинает уменьшаться, можно приближенно считать началом основного участка 3.

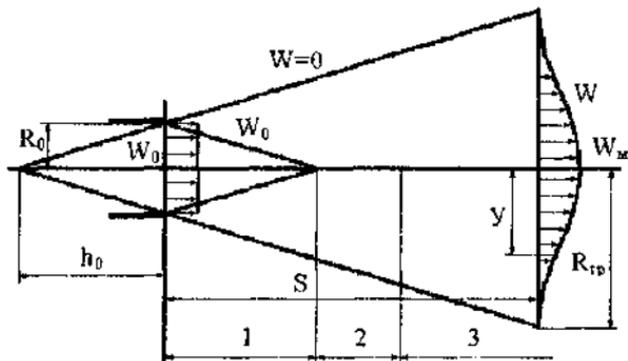


Рис. 9. Схема прямооточной турбулентной струи

С целью изучения условий и параметров, обеспечивающих устойчивое и безопасное ведение технологических процессов переработки пылеобразующих материалов, была разработана математическая модель равномерного распределения частиц в технологическом

объеме. Модель позволяет изучать критические условия распространения пламени в дисперсных системах при различном давлении в реакционном сосуде и различной величине распыляющего импульса. Были приняты следующие граничные условия:

- изменение величины распыляющего импульса от 0 до 100 кПа;
- определение скоростей частицы с момента времени от 0 с;
- расстояния от сопла до этой частицы по оси потока от 0 м;
- время пролета частицы от 0 с.
- область работы модели по давлению в технологическом объеме от 10 На до 0,3 МПа.

Механизм процессов переноса в струях, связанный с передачей импульса окружающей среде и вовлечением ее в движение, позволяет нам использовать при исследовании основные закономерности развития турбулентных струй.

Граница струи на основном участке расположена на расстоянии $R_{гр}$ от оси потока и определялась по выражению:

$$R_{гр} = \frac{3,3 - R_0 \cdot w_0}{w_M}, \quad (20)$$

где w_0 - начальная скорость потока, м/с; w_M - скорость на оси струи основного участка, м/с.

Затухание скорости на оси струи определялось из соотношения:

$$\frac{w_M}{w_0} = \frac{0,96}{0,29 + a \cdot S/R_0}, \quad (21)$$

где S - расстояние от среза сопла до точки на оси, где определяется затухание скорости, м.

Была составлена программа, которая позволила рассчитать внешние габариты струи, а соответственно и образующегося пылевого облака с равномерно распределенными частицами при различном давлении в реакционном сосуде и различной величине распыляющего импульса, на основании которого можно определить необходимые размеры установки для проведения эксперимента.

Из массива результатов по изменению скорости частиц по оси потока при различных временах выхода из сопла представляют интерес два крайних условия:

- 1) при начальной величине распыляющего импульса 30,3 кПа, так как меньшее значение распыляющего импульса не будет вовлекать пылевые частицы в воздушный поток;
- 2) при начальной величине распыляющего импульса 70,7 кПа, большее значение не целесообразно из-за того, что будет возникать большая турбулизация потока, что повлечет образование областей с неравномерной концентрацией пылевых частиц.

Эти зависимости представлены на графиках (рис. 10-13), они характеризуют изменение гидродинамики потока во времени. По мере протекания процесса, частицы начинают двигаться по всему объему, охваченному потоком с одинаковой скоростью, что должно обеспечивать равномерное распределение частиц в моделируемом пылевом облаке.

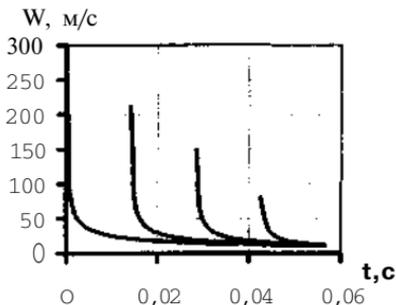


Рис. 10. Зависимость изменения скорости частиц на оси потока, вылетевших из сопла форсунки от времени, при величине начального распыляющего импульса 70,7 кПа.

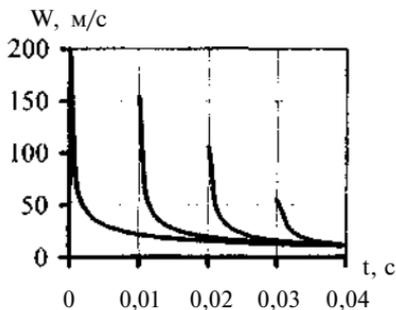


Рис. 11. Зависимость изменения скорости частиц на оси потока, вылетевших из сопла форсунки от времени, при величине начального распыляющего импульса 30,3 кПа.

Из рис. 12 и рис. 13 видно, что частицы, вылетевшие в последующие моменты времени, преодолевают большее расстояние, чем предыдущие за это же время. Это обуславливается торможением потока в реакционной камере.

Было установлено, что высота реакционной камеры не может позволить использовать время распыления 0,04 с для распыляющего импульса 30,3 кПа и 0,0568 с для распыляющего импульса 70,7 кПа, так как за это время некоторая часть частиц уже оседает на дне реакционного сосуда, что создаст погрешность в плотности создаваемого пылевого облака.

Это следствие было учтено при разработке методики эксперимента. А также: высота реакционного сосуда должна быть не менее 0,6 м, но не более 1,2 м. Величину же распыляющего импульса рекомендуется варьировать в зависимости от объема и удельного веса распыляющей навески, но не менее 30,3 кПа.

Из анализа полученных результатов видится необходимость рассмотрения распределения скоростей частиц по сечению потока (рис. 14, рис. 15). Кривая 1 характеризуется большим перепадом скоростей по сечению потока. По мере расширения диаметра струи и удаления от среза сопла характер кривой описывающей поле скоростей становится более пологим.

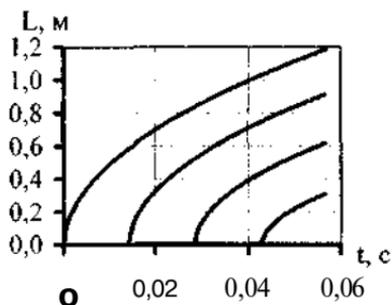


Рис. 12. Зависимость расстояния преодолеваемого частицей, от времени вылета из сопла форсунки, при величине начального распыляющего импульса 70,7 кПа.

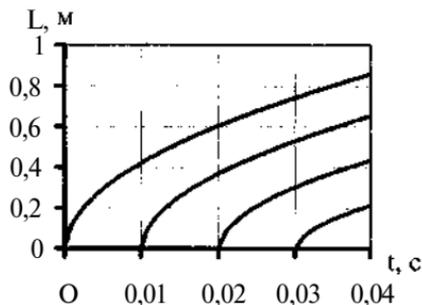


Рис. 13. Зависимость расстояния преодолеваемого частицей, от времени вылета из сопла форсунки, при величине начального распыляющего импульса 30,3 кПа.

Из анализа рис. 14 и рис. 15 видно, что минимальный диаметр реакционной камеры необходимо брать не менее 0,08 м, максимальный не менее 0,3 м.

Анализируя результаты полученных полей скоростей по сечению потока при величине распыляющего импульса 70,7 кПа, был сделан вывод, что минимальный диаметр реакционной камеры необходимо брать не менее 0,12 м, а максимальный не более 0,4 м.

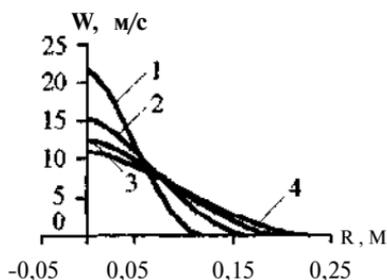


Рис. 14. Зависимость изменения величины скорости движения частиц в струе при удалении от оси потока: для частиц, вылетевших в первый момент времени, при начальной скорости 198,556 м/с, величины распыляющего импульса 30,3 кПа и времени после начала распыления: 1 - через 0,01 с; 2 - 0,02 с; 3 - 0,03 с; 4 - 0,04 с.

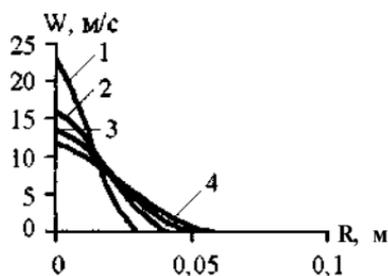


Рис. 15. Зависимость изменения величины скорости движения частиц в струе при удалении от оси потока: для частиц, вылетевших через 0,3 с после начала распыления, при начальной скорости 55,12 м/с, величины распыляющего импульса 30,3 кПа и времени после начала распыления: 1 - через 0,0026 с; 2 - 0,0051 с; 3 - 0,0071 с; 4 - 0,0096 с.

Однако применение реакционных камер с диаметрами большими 0,3 м, очевидно, будет иметь практическое затруднение, так как при величине распыляющего импульса, близкого к 101 кПа, у частиц возникают, в силу большой

турбулизации потока, большие горизонтальные составляющие, что может повлечь образование в пылевом облаке областей с неравномерной концентрацией.

Из полученных результатов можно сделать вывод о габаритах реакционного сосуда, в котором будет достигаться равномерное распределение частиц по объему камеры. Такое распределение частиц необходимо для достижения чистоты эксперимента и, соответственно, его воспроизводимости.

Полученные при расчете по математической модели результаты по распределению частиц во взвешенном состоянии проверялись экспериментально. Для этой цели были проведены опыты по определению концентрации пыли в поперечном сечении потока аэрозвеси по всей длине камеры. Равномерность распределения частиц во взвешенном состоянии проверялась по методу Уилтона путем отбора проб из потока. По результатам экспериментальной проверки был сделан вывод о размерах реакционной камеры для исследований: ее длина составляет не менее 0,5 м, а оптимальный диаметр - 0,14 м.

На основании литературного обзора и экспериментальных исследований была разработана методика и установка для определения критических условий распространения пламени по пылевым взвесям, как при нормальных условиях, так и при пониженных давлениях (рис. 16), состоящая из следующих узлов:

А. Испытательная камера с размерами, рекомендованными в разработанной модели.
Б. Блок формирования пневматического импульса состоит из компрессора (рис. 16), крана, ресивера с манометром, электромагнитного крана, форсунки, расположенной в верхней части верхнего фланца. Конусный распылитель с эжекционной форсункой состоит из конуса, служащего одновременно верхней крышкой реакционного сосуда, и форкамеры. Форкамера состоит из корпуса, крышки и форсунки. Образец исследуемого вещества, помещенный в форсунку, взвихривается при кратковременной подаче сжатого воздуха и через патрубок, соединяющий форкамеру с конусом распылителя, увлекается в реакционный сосуд, где образует пылевое облако с равномерно распределенными частицами.

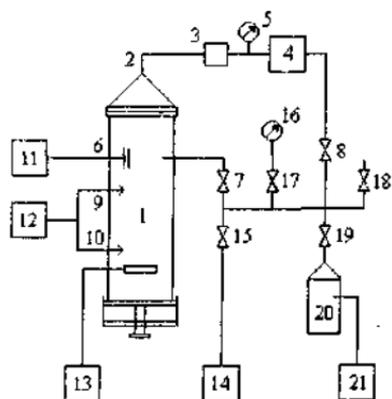


Рис. 16 - Блок-схема экспериментальной установки по исследованию критических условий распространения пламени в аэрозвесах:

1 - реакционная камера; 2 - распылительный конус, совмещенный с форсункой; 3 - электромагнитный клапан; 4 - ресивер; 5, 16 - мановакуумметр; 6 - тензометрический датчик давления; 7, 8, 15, 17, 18, 19 - вентиля; 9, 10 - термодатчики; 11 - тензометрическая станция с осциллографом С8-12; 12 - многоканальный самописец Н-338-6П; 13 - источник зажигания; 14 - компрессор; 20 - фильтр (воздухоочиститель); 21 - вакуумный насос.

В. Блок управления состоит из источника зажигания, электронной части, обеспечивающей синхронизацию срабатывания источника зажигания с моментом начала распыления и включения регистрации показаний. Это достигается следующим образом: по готовности установки к эксперименту включают тумблером реле времени ВЛ-34У4, разогрев спирали происходит через 10 секунд, через это время срабатывает электромагнитный клапан, линия задержки

выдерживает его в открытом состоянии заданное время, по истечению 11 секунд источник зажигания отключается. Одновременно работает блок регистрации.

Г. Блок регистрации, состоящий из многоканального самописца Н-338-6П, снабженного термопарными датчиками для контроля накала спирали и распространения пламени и тензодатчика с усилителем УТ-4. Запись ведется на диаграммной ленте с единой временной отсечкой.

Показатели пожаровзрывоопасности определялись в соответствии с ГОСТ 12.1.004-89, в качестве окислителя использовался атмосферный воздух.

Определяя область горения пылевой взвеси при изменении температуры иницирующего источника зажигания, его температуру понижают на 50 °С. Определив при этой температуре все критические характеристики, ее вновь понижают на ту же величину 50 °С. Так поступают до тех пор, пока пылевая взвесь не перестанет воспламеняться, а горение распространяться по всему объему реакционной камеры.

Для исследования области горения пылевой взвеси при пониженных давлениях, давление в реакционной камере понижают на 10,1 кПа, и определяют критические характеристики, после чего давление в камере вновь понижают на 10,1 кПа. Для создания пневматического импульса в ресивере либо создается разрежение, либо, наоборот, нагнетается избыточное давление.

Таким образом, разработанная методика исследований предполагает последовательно, поэтапно изучать критические концентрации пылевой взвеси, по которой возможно распространение пламени на лабораторной установке, моделирующей равномерно распределенные по концентрации пылевые облака. Методика экспериментально показывает область горения пылевой взвеси при изменении температуры иницирующего источника зажигания и позволяет применить результаты к конкретному производству после проведения соответствующих экспериментов.

На разработанной установке по методике для изучения критических условий распространения пламени в аэровзвесах были проведены исследования пылевзвеси сахарозы (рис. 17), левомицетина (рис. 18), бензойной кислоты, нитруллина, новокаина и глюкозы. Результаты исследования приведены в табл. 2.

Исследования показали, что нижний предел распространения пламени по аэровзвеси сахарозы определяется при концентрации аэровзвеси 48 г/м^3 и температуре иницирующего источника зажигания $850 \text{ }^\circ\text{C}$, хотя для этой фракции, при определении предельных условий горения при температуре иницирующего источника зажигания $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, утвержденной Государственным стандартом, величина нижнего предела воспламенения составляет 52 г/м^3 , а в справочной литературе приводится нижний предел воспламенения аэровзвеси сахарозы $92,5 \text{ г/м}^3$ для пыли фракцией $13\text{-}10^6 \text{ м}$.

Проведенный анализ показывает, что учет температурного фактора источника зажигания требует пересмотра категорирования пожаровзрывоопасности для аэровзвеси сахарозы, т.к. существующая оценка вещества - пожароопасное, а нижний предел распространения пламени в аэровзвеси ниже установленной стандартом величины 65 г/м^3 . Это значит, что технологическое оборудование и производственный регламент должны строиться из условий переработки взрывоопасного продукта, а не пожароопасного. А как следствие, изменение особенностей конструкции и технологии, потенциальной опасности, основных факторов пожара и взрыва технологического оборудования, в котором присутствует это вещество, и мер пожаро- и взрывобезопасности.

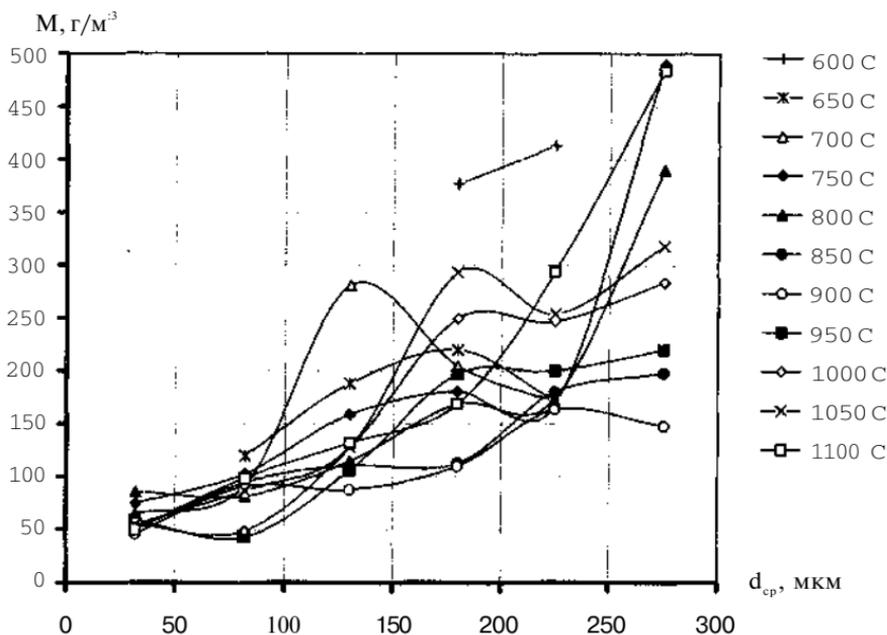


Рис. 17. - Зависимость величины критических условий распространения пламени по аэрозвеси сахарозы от среднего диаметра частиц при различной температуре инициирующего источника зажигания

Из представленных экспериментальных данных (рис. 17) хорошо видно, что в физико-химической картине процессов, протекающих в зоне реакции, наблюдаются интересные кинетические особенности, характеризующие влияние температуры инициирующего источника зажигания на уровень химических реакций в зоне горения. В то же время полученные кинетические зависимости наглядно характеризуют изменение чувствительности аэрозвеси в определенных фракционных составах.

Таблица 2. Результаты исследований критических условий распространения пламени в аэрозвесах исследуемых веществ, определенные по ГОСТ и по разработанному методу

Наименование вещества	НКПР при н.у., г/м ³		НКПР при пониж.давл г/м ³	Т° воспл аэрозвеси, °С	Уд.об. электр. сопр., Ом·м
	ГОСТ	Разработанный метод			
Бензойная к-та	27,5	20,2	17,5	-	> 10 ¹⁴
Нитруллин	32,3	25,7	-	-	-
Сахароза	52,0	48,0	36,0	600	2,1·10 ⁸
Глюкоза	55,0	45,0	34,6	600	-
Новокаин	47,5	40,0	-	-	2,4·10 ¹⁰
Левомецитин	42,5	37,8	30,0	600	5,5·10 ¹¹
ИКК	41,0	19,0	16,9	650	2,89·10 ¹²

На рис. 18 представлены результаты исследований критических условий распространения пламени по аэровзвеси левомицетина. Экспериментальные данные говорят о том, что по классификации пожаровзрывоопасности это взрывоопасное вещество с пределом воспламенения $37,8 \text{ г/м}^3$, хотя, при определении предельных условий горения по методике, утвержденной Государственным стандартом, величина нижнего предела воспламенения составляет $42,5 \text{ г/м}^3$.

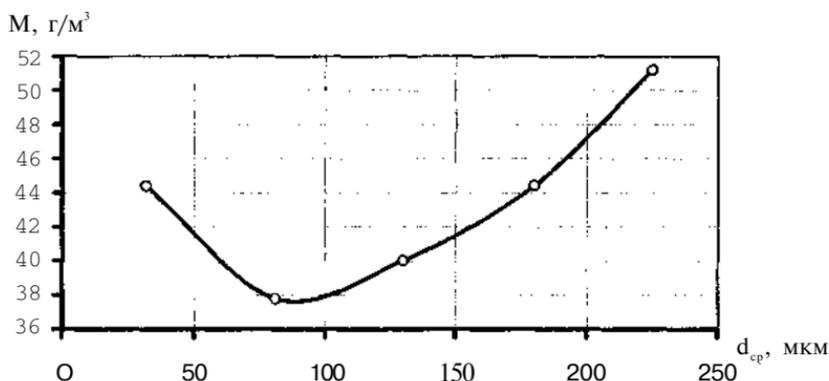


Рис. 18. Зависимость величины критических условий распространения пламени по аэровзвеси левомицетина от среднего диаметра частиц

Впервые исследовалась область горения пылевой взвеси при пониженных давлениях. Методика апробировалась на органическом веществе сахарозе. Результаты представлены на рис. 17 (результаты эксперимента при нормальных условиях) и рис. 19 (при условии пониженного давления).

Из рис. 19 видно, что нижний предел распространения пламени по аэровзвеси сахарозы для фракции 0-63 мкм определяется при концентрации аэровзвеси 36 г/м^3 , хотя для этой фракции величина нижнего предела воспламенения составляет 58 г/м^3 (рис. 18) и 43 г/м^3 для фракции 63-100 мкм. Предположение, высказанное выше о расширении области горения при пониженных давлениях, подтвердилось.

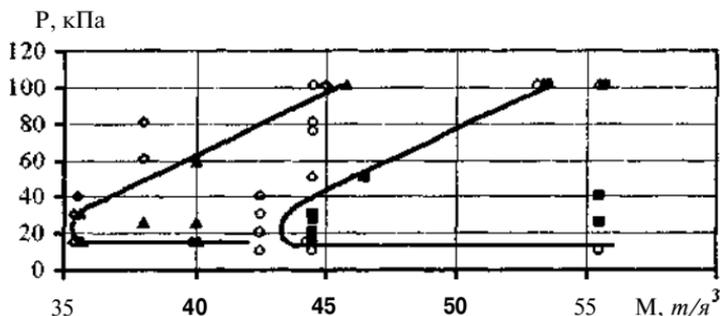


Рис. 19. Зависимость величины критических условий распространения пламени по аэровзвеси сахарозы от давления в реакционной камере и среднего диаметра частиц:

невоспламенение: \circ - фракции 0-63 мкм; \circ - фракции 63-100 мкм

Исследования критических условий распространения пламени других веществ при условии пониженного давления в реакционной камере приведены в табл. 2.

Эти результаты показывают, что испытуемое вещество при пониженных давлениях представляет еще большую опасность, вследствие чего повышается риск использования технологических процессов, в которых при пониженных давлениях обращаются эти материалы.

Также изучалась температура воспламенения аэровзвеси $T_{\text{в}}$ (результаты представлены на рис. 20 и в табл. 2). Этот параметр не введен в номенклатуру определяемых показателей пожаровзрывоопасности аэровзвесей, но его введение расширяет информацию, необходимую при анализе опасности пылевых взвесей. Температуру воспламенения аэровзвесей можно рассматривать как температуру, при которой экзотермическая реакция имеет столь высокую скорость, что эффектом выделения тепла уже нельзя пренебречь. Такое определение позволяет установить $T_{\text{в}}$ в довольно узком интервале (что подтверждается экспериментом).

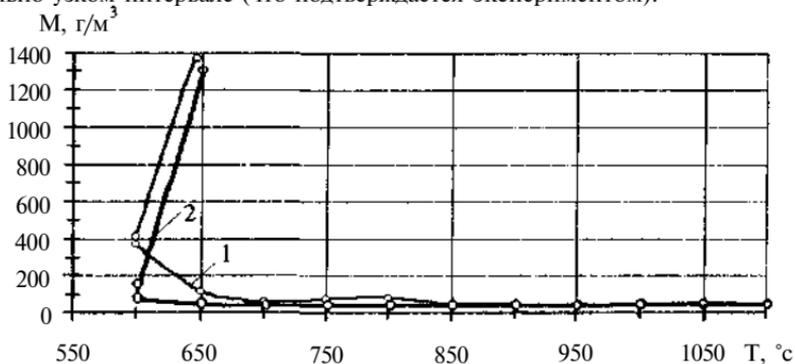


Рис. 20. Зависимость предельной величины распространения пламени по аэровзвеси от критической температуры инициирования горения:

1 - аэровзвеси сахарозы, 2 - аэровзвеси левомицетина

Исследование критической температуры источника зажигания аэровзвеси сахарозы (рис. 20) показало, что при температуре в 600 °C горение пылевой взвеси осуществляется только в узком диапазоне концентраций 350–450 г/м³, а вне этой области, даже при концентрациях 1500 г/м³, воспламенения смеси не наблюдалось.

Сделанное ранее предположение о существовании некоторой минимальной температуры инициирующего источника зажигания для аэровзвеси сахарозы, экспериментально подтвердилось, она составляет 600 °C.

Результаты определения критической температуры инициирования горения аэровзвеси левомицетина так же представлены на рис. 20. Из графика видно, что горение смеси осуществляется в узком диапазоне концентраций 80–150 г/м³ при температуре в 600 °C, вне этой области воспламенение смеси не наблюдалось. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о температуре воспламенения аэровзвеси левомицетина, которая составляет 600 °C.

На основе полученных результатов можно сформулировать условия пожаро- и взрывобезопасности при переработке пылеобразующих веществ и материалов. Невоспламеняемость горючей среды при внесении в нее источника зажигания с температурой меньшей $T_{\text{в}}$ аэровзвеси можно определить из выражения:

$$T_{\text{без}} \leq 0,8 T_{\text{в}}, \quad (22)$$

где $T_{\text{без}}$ - безопасная температура для аэровзвеси, °С; $T_{\text{в}}$ - температура воспламенения аэровзвеси, °С.

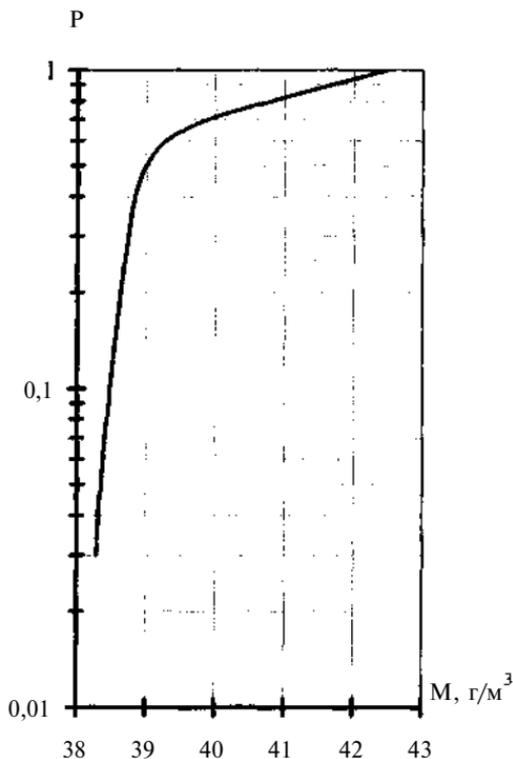
Исходя из выражения (22) можно сделать вывод, что для аэровзвеси сахарозы $T_{\text{без}}$ составит 480 °С. Другими словами, если в технологическом оборудовании, в котором горючее вещество находится в состоянии аэровзвеси, появится источник зажигания с температурой равной или меньшей $T_{\text{без}}$, воспламенения не произойдет. Но надо иметь в виду, что при длительном нахождении этого источника внутри оборудования его безопасность будут определять другие показатели пожаровзрывоопасности.

Проведенный эксперимент изучения чувствительности аэровзвеси левомицетина к инициирующему источнику зажигания, был рассмотрен с использованием статистического метода. При этом анализировалась вся температурная и концентрационная область горения аэровзвеси. Вероятность воспламенения и распространения пламени в рассматриваемой области:

$$P = \frac{\sum m}{\sum n}, \quad (23)$$

где $\sum m$ - количество опытов, в которых произошло воспламенение аэровзвеси; $\sum n$ - общее количество опытов.

Рис. 21. Зависимость величины вероятности распространения пламени по аэровзвеси левомицетина от концентрации горючего вещества:



Рассматривая, таким образом, все экспериментальные результаты, можно определить вероятность события в самой низкой точке кривой, точке критического распространения пламени при оптимальных условиях. Полученная зависимость представлена в полулогарифмических координатах на рис. 21. Из нее видно, что при минимальных значениях концентрации и оптимальных значениях инициирующего источника зажигания определяется концентрация аэровзвеси, по которой может распространиться пламя с вероятностью этого события 10^{*2} .

Если анализировать технологическую систему в целом, мы придем к выводу, что в системе может образовываться взрывоопасная концентрация аэровзвеси с традиционной вероятностью распространения пламени в ней 10^{*2} от инициирующего источника зажигания искр статического электричества, появление которых с энергией

зажигания аэровзвеси вероятно с 10^3 . Следовательно, взрывобезопасность системы оценивается как 10^4 .

Еще один вывод можно сделать, анализируя рис.21. Совершенствовать методику определения критических условий распространения пламени можно продолжать, но существенных результатов добиться не удастся, так как по характеру наклона кривой вероятности распространения пламени по аэровзвеси существенных сдвигов в величине предела распространения пламени не предвидится. Очевидность этого утверждения характеризуется тем, что величина предела распространения пламени, на которую уточняется результат, приблизится к величине систематической погрешности сопутствующих операций.

На пилотной установке, представляющей собой аэрофонтанную сушилку производительностью 10 кг/ч (рис. 22), изменяя скорость потока теплоносителя, его температуру и концентрацию твердой фазы в пылевой взвеси, были получены регламентные условия ведения процесса сушки для ряда фармацевтических субстанций.

Исследования кинетики сушки этих препаратов показали, что чаще в материале присутствует только гигроскопическая влага, говорящая о том, что вещество является капиллярно-пористым материалом сложной структуры, из которого последовательно удаляется свободная, капиллярная и адсорбционная влага.

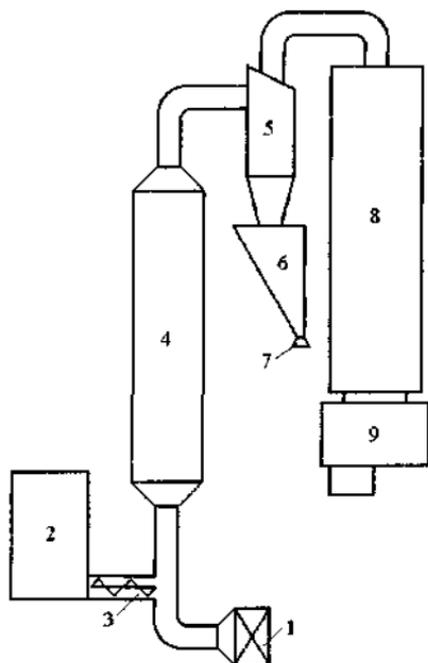


Рис. 22. Схема пилотной установки для исследования безопасных режимов сушки лекарственных препаратов:

1 - калорифер; 2 - бункер сырого продукта; 3 - шнековый дозатор; 4 - сушильная камера; 5 - циклон; 6 - бункер сухого продукта; 7 - клапан-мигалка; 8 - рукавный фильтр; 9 - вентилятор

На основании анализа проведенных исследований был сделан вывод о возможности сушки порошковой субстанции в аппаратах с активным гидродинамическим режимом. Было установлено: необходимо увеличить скорости теплоносителя и снижение концентрации пылевой взвеси, что разобьет образующие агломераты; совместить трубу-сушилку с пневмотранспортом, что позволит использовать его участок для досушивания продукта.

На пилотной установке были получены регламентные условия ведения процесса сушки. Следует отметить, что процесс сушки проходил при высокой степени электризации высушиваемого продукта.

В пятой главе приводятся теоретические исследования влияния некоторых факторов на процесс горения дисперсных систем. Рассмотрено влияние реакционного объема и температуры источника зажигания на предельные условия воспламенения аэровзвесей. Из перечисленных выше параметров, влияющих на условия

воспламенения, рассматривается геометрический фактор установки; отношение экспериментального объёма к его поверхности.

В случае, когда воспламенение аэровзвеси происходит в любом месте рассматриваемого объема, а теплопередача излучением от фронта пламени в предпламенную область принимается в виде потока параллельных лучей, уравнение полного поглощения излучения аэровзвесью имеет вид:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-N\sigma x} = \Phi_0 e^{-x/L}, \quad (24)$$

где Φ_0 - энергия излучения, Дж; x - толщина слоя поглощения, м; σ - площадь сечения поглощения, м²; N - количество частиц в единице объема; L - длина свободного пробега излучения, м.

При постоянстве σ и N , x характеризует долю поглощения излучения аэровзвесью и, соответственно, долю свободного прохождения потока излучения. Толщина слоя поглощения не является постоянной величиной, а зависит от геометрической формы экспериментального объёма и его размеров. В рассматриваемом случае x есть расстояние от центра объёма произвольной формы до ограничивающей его поверхности. Кроме того, то излучение, которое выходит за пределы объёма, уже не может влиять на состояние аэровзвеси, оно является чистыми потерями.

Таким образом, для того чтобы установить соотношение между количеством тепла, поглощенного аэровзвесью, и величиной теплопотерь излучением в реакционной камере той или иной экспериментальной установки, необходимо в формулу (24) подставлять определенное значение текущей координаты x , ф. Геометрическое место точек выхода лучей из объёма есть поверхность, ограничивающая этот объём и будет поверхность реакционного объёма экспериментальной установки (или поверхность технологического объёма).

Поэтому:

$$x_{\text{эф}} = \frac{V}{S}, \quad (25)$$

где V - объём занимаемый аэровзвесью, м³; S - поверхность, ограничивающая облако аэровзвеси, м².

В этом случае формула (24) примет вид:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\sigma N x_{\text{эф}}} = \Phi_0 e^{-\frac{V}{SL}}. \quad (26)$$

Из формулы (26) следует, что чем больше реакционный объём экспериментальной установки, тем больше вероятность поглощения излучения, тем меньше теплопотери. И наоборот, чем больше поверхность, тем больше вероятность свободного выхода излучения за пределы облака аэровзвеси, тем больше теплопотери излучения.

В результате решения вариационной задачи сделан к вывод: из объемных фигур цилиндр имеет максимум отношения объёма к поверхности, причем экстремум достигается, когда его высота примерно равна диаметру.

В этом случае имеем:

$$x_{\text{эф}} = \frac{1}{3} R, \quad (27)$$

где R - радиус основания цилиндра, м.

В экспериментальной установке с реакционной камерой цилиндрической формы, как было показано выше, возможности создания аэровзвеси контролируемой концентрации много шире, по сравнению с сосудом сферической формы. Таким образом, при определении критических условий горения, следует использовать реакционную камеру цилиндрической формы, высота которой равна диаметру.

Для этого случая уравнение (26) будет иметь вид:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\frac{R}{3L}}. \quad (28)$$

Формула (28) позволяет сделать следующие выводы: увеличение размера реакционной камеры экспериментальной установки (R) приводит к уменьшению теплотеря излучения и, как следствие этого, к уменьшению концентраций исследуемого вещества. Преобразования приводят к определению зависимости концентрации исследуемого вещества от геометрического фактора реакционного объема экспериментальной установки:

$$k = \frac{k_0 S V_0}{V S_0}, \quad (29)$$

где k - величина минимальной концентрации исследуемого вещества, $г/м^3$, % об, по которому распространяется горение, для установки с переменными габаритами V и S ; m ; k_0 - минимальная концентрация исследуемого вещества в установке с габаритами V_0 и S_0 .

Полученное выражение (29) показывает, что при сопоставлении различных экспериментальных исследований по критическим условиям распространения пламени в аэровзвесах, необходимо обращать внимание на геометрический фактор реакционных камер установок, в которых они определялись.

Рассмотрено влияние температуры нагрева источника зажигания на нижний концентрационный предел распространения пламени в аэровзвесах и необходимости внесения подобных коррективов на примере определения критических условий распространения пламени в аэровзвесах различного класса веществ.

Из краткого анализа представленных выше экспериментальных данных по горению аэровзвесей было установлено, что основным фактором теплообмена при горении аэровзвеси является излучение. Это и было взято за основу расчета предварительного разогрева летящих по баллистической траектории частиц до момента соприкосновения их с источником зажигания. При этом предполагалось, что лучистый поток, падающий на поверхность частицы, полностью поглощается, и что газовая фаза прозрачна для излучения.

Доктор технических наук Г.С. Шимонаев, опираясь на результаты, полученные методом ИК-лазерной фотохимии, внес существенные изменения в традиционную оценку оптической прозрачности горючей смеси и определил роль излучения пламени в процессе горения. Поглощение излучения и электронные переходы в молекулах кислорода, водорода, насыщенных углеводородов наблюдаются при действии УФ-излучения с длиной волны меньше 200 им. В то же время основная часть энергии, которую излучает пламя, приходится на инфракрасную область: видимое и ультрафиолетовое излучение составляет менее 1 % в его энергетическом балансе. Все это давало основание полагать, что горючая смесь прозрачна для излучения пламени.

Вероятность фотофрагментации молекул резко возрастает при воздействии излучения широкого частотного диапазона: при возбуждении резонансной частотой молекула приобретает способность поглощать энергию нерезонансного излучения. Причем при возбуждении монохроматическим излучением энергетический барьер в десятки раз выше, чем при возбуждении излучением с широким диапазоном частот. Г.С. Шимонаев считает очевидным, что фрагментация молекул горючей смеси в предпламенной зоне - следствие многофотонного поглощения ими излучения

пламени. Многофотонное поглощение удалось обнаружить не только в инфракрасной области спектра, но как и в видимой, так и в ультрафиолетовой.

В случае использования электрической спирали в качестве источника зажигания представляющая интерес область спектра излучения начинается с длинноволновой границы ультрафиолетового диапазона спектра и включает видимый свет и инфракрасную область спектра.

Естественно, процесс фрагментации молекул протекает во времени в зависимости от строения молекул, размера, от наличия определенных функциональных групп. Понятно, что многоатомные органические соединения предварительно нужно разложить на мелкие фрагменты, что требует затрат энергии и времени, и чем крупнее частица, тем более продолжительнее процесс ее фрагментации. Этим можно объяснить возрастание величины НКПР с ростом молекулярной массы вещества. По всей вероятности, увеличение длительности процесса прогрева связано с периодом индукции химической реакции, в течение которого система существенно меняется, а концентрации веществ остаются постоянными.

Для воспламенения аэровзвеси, как и для любого химического процесса, любой химической реакции, период индукции может играть самую существенную роль. При определении критических условий воспламенения аэровзвесей важно также соотношение времен стадий (времени пролета частицы от момента появления частицы в объеме взрывного цилиндра, времени прогрева частицы и периода индукции реакции термической деструкции или воспламенения частицы).

Результаты проведенного анализа показывают, что воспламенение облака аэровзвеси во времени и пространстве зависит от температуры нагрева инициирующего источника зажигания и скорости полета частиц в реакционной камере.

Исследованиями было установлено, что принцип аддитивности, реализуемый формулой Ле Шателье (2), наблюдается так же и в гибридных системах. Принято считать, что в состав гибридных систем входят газовые, паровые и дисперсные компоненты. Эти системы представляют собой одно из основных состояний перерабатываемого материала в химической технологии. Оценка опасности подобных систем практически не решена, о чем свидетельствуют литературные источники.

Критические условия распространения пламени (КУР) могут выражаться в % об. или в г/м³. Перевод этих значений из объемных в массовые и наоборот производится по формулам:

$$\text{КУР (г/м}^3\text{)} = \frac{273,15 \cdot M \cdot \text{КУР (\% об.)}}{2,24 \cdot T}; \quad \text{КУР (\% об.)} = \frac{2,24 \cdot T \cdot \text{КУР (г/м}^3\text{)}}{273,15 \cdot M}, \quad (30)$$

где M - молярная масса горючего, г/моль; T - температура, °К.

На представленной в главе 4 экспериментальной установке были проведены исследования на модельной системе, образующейся в технологическом аппарате при сушке левомецетина от изопропилового спирта. Результаты проведенных исследований представлены на рис. 23.

С целью определения опасной области концентраций компонентов модельной системы, обращающейся в технологическом оборудовании, вводится критерий опасности До, который зависит от концентрации горючей компоненты в смеси, изменение которых может привести к опасным ситуациям.

Тогда пограничное состояние гибридной системы, представленной на рис. 23, будет определяться уравнением:

$$D_0 = 3,57x + 0,5y. \quad (31)$$

Если $D_0 \geq 1$, система содержит опасную концентрацию одного из компонентов горючей смеси, если $D_0 < 1$, система содержит неопасную концентрацию одного из компонентов горючей смеси.

Рис. 23. Критические условия распространения пламени в системе левомицетин-изопропиловый спирт-воздух; KUP_1 - концентрация изопропилового спирта, KUP_2 - концентрация левомицетина



Представляется разработанная методика расчета критических условий распространения пламени в гибридных системах, представляющая большое практическое значение, так как позволяет еще на стадии проектирования оценивать опасность обрабатываемой системы в технологическом оборудовании. Полученная совокупность знаний о поведении модельных систем дает возможность разработки названной расчетной методики.

Проведя статистический анализ представленного выше ряда гибридных систем, было установлено, что область, характеризующую пограничное состояние системы, можно описать функцией (32). За критерий опасности D_0 рассматриваемой системы предлагается взять следующую функцию

$$D_0 = f(k_i, r_k, C_i, P_i, \tau, T_n), \quad (32)$$

где k_i - величина критических условий распространения пламени в системе i -го компонента, $г/м^3$, % об, концентрация i -го компонента, берется с учетом геометрического фактора реакционного объема экспериментальной установки согласно выражения (29); C_i - концентрация горючего i -го компонента в системе; размерность, как исходных компонентов рассчитываемой системы, так и получаемого результата критических условий распространения пламени (KUP) может выражаться в % об. или в $г/м^3$ перевод этих производятся по формулам (30); r_k - характеристический размер, представленный как радиус вписанной окружности, м, определяется экспериментальным путем, характеризует возможность вещества, находящегося в технологическом объеме радиусом r_k , накапливать электростатический заряд, способный зажечь перерабатываемую систему; P_i - давление в рассматриваемой системе, Па; τ - время, с, в течение которого достигается скорость, обеспечивающая тепловое воспламенение, т.е. период индукции теплового воспламенения; T_n - температура воспламенения взрывзвеси, К.

За критерий опасности D_0 рассматриваемой системы предлагается брать точку, отвечающую всем составляющим выражения (32) и находящуюся на пересечении пограничной прямой, показывающей изменение состояния гибридной системы при изменении соотношения реагентов, с прямой, показывающей пропорциональную концентрацию $0,5k_i$ этих реагентов. Как показывают результаты, расчетное определение критических условий распространения пламени в системе при этих концентрациях имеет минимальную погрешность.

Определение концентрации горючих компонентов представляемых как критерий опасности До рассматриваемой системы в указанной точке, производится по следующей формуле:

$$D_0 = \sum_{i=1}^n 0,5k_i . \quad (33)$$

Для определения величины, представляющей собой критические условия распространения пламени в рассматриваемой системе и проведения первичного анализа ее опасности, необходимо воспользоваться следующей формулой

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{C_i} - 1 , \quad (34)$$

если $D \geq D_0$, система содержит опасную концентрацию n компонентов горючей смеси, если $D < D_0$, система содержит неопасную концентрацию n компонентов горючей смеси.

Данное выражение имеет область применимости в широком диапазоне как концентраций, так и давлений. Ограниченность применимости может вызываться малоизученностью критических условий распространения пламени в рассматриваемых системах при различных давлениях. В представляемых обычно нормативно-технических материалах величина k_j определена для давления 101 кПа.

В случае наличия в системе дисперсной фазы, представленной пылеобразующим материалом, верхний предел критических условий распространения пламени не рассматривается, так как при изучении критических условий распространения пламени в индивидуальных пылеобразующих системах классическое понятие верхнего предела отсутствует'.

В шестой главе рассматриваются вопросы разработки принципов конструирования с обеспечением пожаро- и взрывобезопасности процессов переработки пылеобразующих материалов. Анализируется порядок обеспечения пожарной безопасности технологических процессов, отличных от процессов повышенной пожарной опасности. Приводится анализ требований к способам обеспечения пожарной безопасности систем предотвращения пожара. Приводится впервые разработанный метод интенсификации процесса сушки взрывоопасных пылеобразующих материалов. Схема проведения исследований приведена на рис. 24.

Из нее видно, что на первом этапе, согласно выражения (32), необходимо:

- изучить в полном объеме пожаровзрывоопасные характеристики высушиваемого продукта и удаляемой влаги;
- провести категорирование по пожаровзрывоопасности этих веществ и производств, где они обращаются;
- используя формулы (33) и (34), провести анализ опасности смеси из пылевзвеси, высушиваемой влаги и окислителя.

На втором этапе, положив в основу полученные экспериментальные данные, предлагается следующее:

- определяем характеристический размер r_k , соответствующий электрическим показателям пожарной опасности веществ и материалов;
- определяются структурно-механические свойства высушиваемого дисперсного материала.

На специальной установке проводятся исследования кинетики сушки исследуемого вещества. Проводятся дополнительные исследования пожаро- и взрывоопасное™ в близких к технологическому процессу условиях.

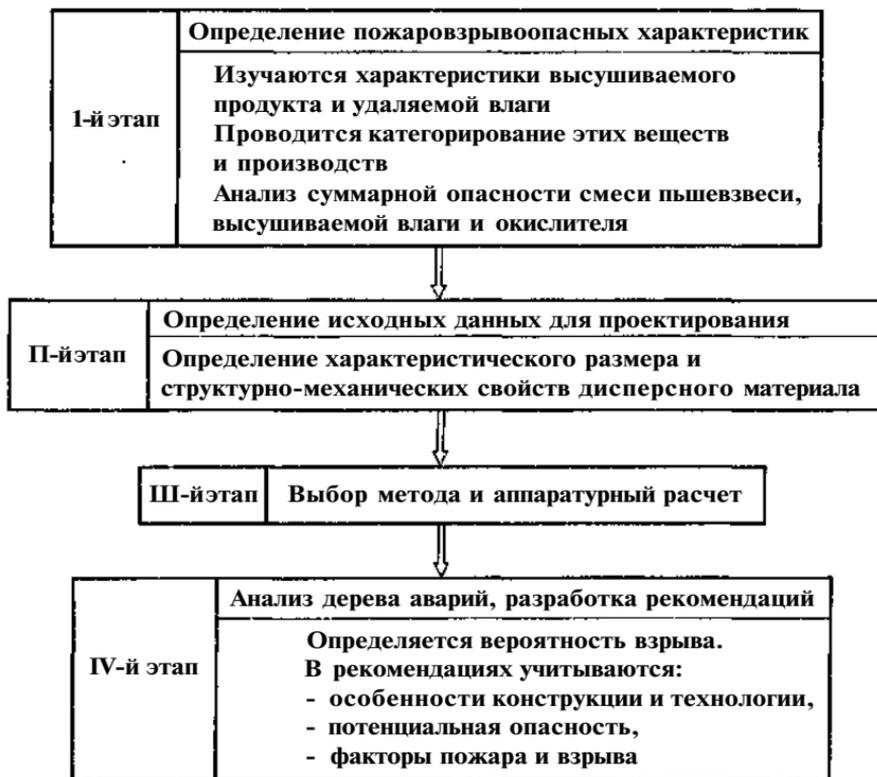


Рис. 24. Схема проведения исследований для разработки рекомендаций по интенсификации процесса сушки

На третьем этапе решаются следующие задачи.

На основе совокупности полученных данных, осуществляется предварительный выбор метода сушки и тип сушильного устройства. При расчетах сушильного устройства и режима сушки руководствуются:

1. концентрацией высушиваемого продукта, равной отношению массы транспортируемого материала к массе Транспортирующего потока $\mu \approx \frac{G}{L}$, здесь необходимо выполнение условия: μ должно находиться вне области воспламенения данной системы, определяемой по уравнению (32), либо экспериментально;
2. линейным характеристическим размером r_c .

Задачи четвертого этапа.

Для технологической системы необходимо рассматривать дерево аварий и определять вероятность взрыва технологического оборудования. Вероятность аварийной ситуации должна быть не более 10^{-4} .

Разрабатываются рекомендации по пожаровзрывобезопасности при организации технологического процесса, при этом учитываются:

- особенности конструкции и технологии;
- потенциальная опасность;
- основные факторы пожара и взрыва технологического оборудования, в котором присутствуют горючие пыли;
- меры пожаровзрывопредотвращения.

Приводятся разработанные рекомендации по технологии и пожаровзрывобезопасности процесса сушки лекарственных субстанций, определены вероятность взрыва технологического оборудования при организации процесса сушки этого продукта и условия конструктивного соответствия требованиям электростатической искробезопасности.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Основные результаты выполненной работы:

1. Предложенный метод обеспечивает решение научно-технической проблемы проектирования и создания технологических процессов для переработки взрывоопасных веществ с повышенными техническими характеристиками, основанный на развитии представлений о критических условиях горения модельных систем и его факторах, новых методах исследования опасности систем, обращающихся в технологическом оборудовании, принципах ее реализации и результатах моделирования.
2. Предложенная расчетная модель распределения частиц в объеме, позволяет моделировать гидродинамические условия технологических аппаратов при разработке и оптимизации массообменных процессов сушки аэрозолей.
3. Результаты проведенных исследований позволяют утверждать:
 - испытуемое вещество при пониженных давлениях, представляет еще большую опасность, чем при нормальных условиях;
 - в физико-химических процессах, протекающих в зоне реакции, наблюдаются кинетические особенности, характеризующие влияние температуры инициирующего источника зажигания на уровень химических реакций в зоне горения.
 - установлен второй предел распространения пламени по давлению для различных модельных систем с минимальной концентрацией горючего компонента и изменяемым давлением в реакционном объеме;
 - результаты исследования критических условий распространения пламени по модельным системам имеют самостоятельное значение.
4. Предложенный метод позволяет оптимизировать массообменные процессы сушки аэрозолей взрывоопасных продуктов, учитывая их пожаровзрывоопасность и исключая применение инертных теплоносителей.
5. Разработанная методология расчета критерия пожаро- и взрывоопасное™ гетерогенных систем позволяет прогнозировать безопасность технологического процесса в статических и динамических условиях его ведения.
6. Рассматривая температуру, при которой экзотермическая реакция имеет столь высокую скорость, что эффектом выделения тепла уже нельзя пренебречь, предлагается ввести в перечень исходных данных для проектирования технологического оборудования показатель «температура воспламенения аэровзвеси» $T_{\text{в}}$, что существенно дополнит информацию, необходимую при анализе опасности пылевых взвесей.

7. Разработанные установка и методика экспериментальных исследований позволяют определять предельные условия распространения пламени в аэрозвесах при давлениях 0,1-101 кПа в реакционной камере с учетом температуры инициирующего источника зажигания.
8. Полученные на пилотной установке регламентные условия ведения процесса, позволили разработать интенсивную и взрывобезопасную технологию сушки ряда лекарственных препаратов, провести замену полочных сушилок на аэрофонтанные, что сократило время сушки субстанций до 1 часа. Результаты работы внедрены на Новокузнецком ОАО «Органика» в технологических регламентах производств лекарственных веществ, что повысило экономический эффект в выпуске готовой продукции и дает доход в 2640 тыс. рублей в год.
9. Материалы диссертации используются в учебном процессе при подготовке студентов химико-технологических и теплоэнергетических специальностей:
 - в курсе лекций по экологии, в темах - процессы и аппараты защиты окружающей среды;
 - в курсе лекций по безопасности жизнедеятельности, в темах - пожарная профилактика, безопасность технологических процессов и производств;
 - при проведении лабораторно-практических занятий вышеуказанного курса;
 - в научно-исследовательской работе студентов по направлению - безопасность технологических процессов химических производств и дипломном проектировании.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях:

1. Сечин А.И., Яшин В.Я. Безопасность технологических процессов в химико-фармацевтических производствах. / Под ред. д.т.н. В.И. Косинцева. - Томск: Изд-во НТЛ, 2003. - 152 с.: ил.
2. Сечин А.И. Безопасность систем перерабатывающих пылеобразующие материалы. / Под ред. д.ф.-м.н. Н.И. Федосова. - Томск: Изд-во НТЛ, 2003. - 138 с: ил.
3. Сечин А.И., Парфенов Л.К., Панин В.Ф., Байков А.В. Установка для исследования концентрационных пределов распространения пламени парогазовых смесей в различных условиях. // Известия Томского политехнического института, - Томск: 1976. Том 258, - С. 26-27.
4. Сечин А.И., Марасанов В.А. Исследование основных показателей пожаро-взрывоопасности сырья, полупродуктов и продуктов производств лекарственных препаратов. Научно-технический отчет по теме 9-36/76ДС. ВИНТИ, гос. регистр. № 76086173, инв. № 02.86.0033630, 1986. - 38 с. Для служебного пользования.
5. Сечин А.И., Марасанов В.А. Исследование основных показателей пожаро-взрывоопасности сырья, полупродуктов и продуктов производств лекарственных веществ. Научно-технический отчет по теме 9-21/79. ВИНТИ, гос. регистр. № 01.82.5.012890 инв. № 02.86.0013332. 29.03.1986. - 171с. Для служебного пользования.
6. Пожаро- и взрывоопасность лекарственных препаратов их полупродуктов, сырья и смесей, применяемых в медицинской промышленности. Нормативно-технический материал. / Шустров Н.И., Трухин В.М., Сечин А.И. и др. // - Минмедпром., Купавна, 1988, Т. 3. - 240 с. Для служебного пользования.
7. Сечин А.И., Быконя В.Н., Марасанов В.А. Пожаровзрывобезопасность процесса сушки изоксазолкарбоновой кислоты в производстве оксациллина. // Повышение надежности и эффективности автоматической пожарной защиты объектов: Тез.

- докл. Всесоюзн. науч.-практ. конф., - Севастополь, 1989. - С. 61-62. Для служебного пользования.
8. Сечин А.И., Гусе Ф.В., Яшин В.Я., Германов С.Б., Фомичев В.А. Оценка пожаровзрывоопасности получения п-нитро-а-бромацетофенона. // Хим.-фарм. ж. - М.: Медицина, № 8, 1994. - С. 56-59.
 9. Сечин А.И., Германов С.Б., Яшин В.Я. Влияние галогенов и треххлористого азота на горение дихлорэтана в кварцевой трубке. // Пожаровзрывобезопасность. 1995. №1, -С. 6-14.
 10. Сечин А.И., Германов С.Б., Гусе Ф.В., Фомичев В.А., Яшин В.Я. Исследование безопасности процесса получения п-нитро-а-бромацетофенона с применением газообразного хлора в лабораторных условиях. // Пожаровзрывобезопасность. 1995. № 2, - С. 20-24.
 11. Сечин А.И., Германов С.Б., Гусе Ф.В., Яшин В.Я. Горение смеси метанола с бромом в кварцевой трубке диаметром 35 мм. // Пожаровзрывобезопасность. 1996. № 1, - С. 16-19.
 12. Сечин А.И. К вопросу разработки безопасного способа сушки пылеобразующих материалов. // Изв. Высших учебных заведений «Химия и химическая технология», Т. 45, вып. 4. 2003.
 13. Сечин А.И., Косинцев В.И., Цветков Д.А. Пожароопасность парогазовых систем обрабатываемых в технологическом оборудовании. // Изв. Высших учебных заведений «Химия и химическая технология», Т. 45, вып. 4. 2003.
 14. Сечин А.И., Яшин В.Я., Виноградов Е.А., Гусе Ф.В. Физико-химические основы интенсификации потенциально опасных процессов. // Изв. Высших учебных заведений «Химия и химическая технология», Т. 45, вып. 4. 2003.
 15. Sechin A.I., Gulyaev M.V., Panin V.F.. Exploration and development of the safety system in explosive risk industrial processes // Reports The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS'99, - Novosibirsk State Technical University, 1999. - Vol.2. - P. 807.
Сечин А.И., Гуляев М.В., Панин В.Ф. Исследование и разработка системы безопасности во взрывоопасных производствах. // Доклады третьего русско-корейского международного симпозиума по науке и технологии, KORUS'99, - Новосибирский Государственный Технический Университет, 1999. - Т.2. - С. 807.
 16. Sechin A.I., Babenko S.A., Sechin A.A. On The Problem Of Tecnological Parameters Defining When Drying Of Finely Disperced Materials Is Investugated. // Proceedings The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS'99, - Novosibirsk State Technical University, 1999. - Vol.2. - P. 689-691.
Сечин А.И., Бабенко С.А., Сечин А.А. К вопросу определения технологических параметров при интенсификации процесса сушки тонкодисперсных материалов // Доклады третьего русско-корейского международного симпозиума по науке и технологии, KORUS'99, - Новосибирский Государственный Технический Университет, 1999.-Т.2.-С. 689-691.
 17. Sechin A.I., Tsvetkov D.A. On the problem of safety of technological equipment during the drying against organic solvents // Reports The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS'99, - Novosibirsk State Technical University, 1999. - Vol.2. - P. 808.
Сечин А.И., Цветков Д.А. К вопросу безопасности технологических устройств при сушке от органических растворителей // Доклады третьего русско-корейского

- международного симпозиума по науке и технологии, КОПУС'99, - Новосибирский Государственный Технический Университет, 1999. - Т.2. - С. 808.
18. Сечин А.И. К вопросу определения пожаровзрывоопасных характеристик парогазовых смесей. // Аспирант и соискатель. - М.: № 5, 2003. - С. 233-236.
 19. Устройство для определения концентрационных пределов распространения пламени: А.И. Сечин, Д.А. Цветков, В.И. Косинцев, А.А. Сечин. Св. РФ № 16956. Оpubл. 27.02.2001.
 20. Сечин А.И., Яшин В.Я. Влияние реакционного объема исследовательской установки на предельные условия воспламенения аэрозвесей. // Аспирант и соискатель. - М.: № 5, 2003. - С. 237-240.
 21. Конусный распылитель дисперсных веществ. А.И. Сечин, В.Я. Яшин, А.А. Сечин, А.А. Поляков. Св. РФ № 23992. Оpubл. 20.07.2002.
 22. Сечин А.И., Гуляев М.В. Пожаровзрывобезопасность технологических процессов в производстве никотиновой кислоты. // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий. Материалы науч.-практ. конф.: - Томск: Изд-во ТПУ, 2000. Т. 1.-С. 193-195.
 23. Сечин А.И., Яшин В.Я. Определение температуры источника вынужденного зажигания аэрозвесей пылеобразующих материалов. // Аспирант и соискатель. - М.: № 5, 2003.-С. 241-243.
 24. Сечин А.И. Безопасность систем перерабатывающих пылеобразующие материалы. // Химия и технология лекарственных препаратов и полупродуктов: Материалы науч.-практ. конф.: - Томск: Изд-во ТПУ, 2002, - С. 5-34.
 25. Сечин А.И. Условия установления конструктивного соответствия технологического оборудования требованиям электростатической искробезопасности в производстве левомицетина. // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий: Материалы второй науч.-практ. конф. - Томск: Изд-во ТПУ, 2002. Т. 2. - С. 323-326.
 26. Сечин А.И., Фролова Г.Н., Федосова В.Д. Обеспечение безопасности технологического процесса окисления п-нитротолуола при увеличении коэффициента заполнения оборудования // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий: Материалы второй науч.-практ. конф. - Томск: Изд-во ТПУ, 2002. Т. 2. - С. 334-337.
 27. Сечин А.И., Фролова Г.Н., Федосова В.Д., Сечин А.А. Обеспечение безопасности технологического процесса получения «нитроэфира» в производстве анестезина. // "Энергетика: экология, надежность, безопасность": Материалы 8-й Всеросс. науч.-техн. конф. - Томск: Изд. ТПУ, 2002. - Т.1. - С. 210-216.
 28. Сечин А.И., Гуляев М.В. Обеспечение взрывобезопасности при статической электризации порошкообразных веществ в некоторых технологических процессах. // "Энергетика: экология, надежность, безопасность": Материалы 5-й Всеросс. науч.-техн. конф. - Томск: Изд-во ТПУ, 1999. - С. 227-228.
 29. Сечин А.И., Цветков Д.А., Косинцев В.И. Организация технологического процесса сушки при пониженных давлениях в производстве оксациллина. // "Энергетика: экология, надежность, безопасность": Материалы 5-й Всеросс. науч.-техн. коиф. - Томск: Изд-во ТПУ, 1999. - С. 231-233.
 30. Сечин А.И., Фролова Г.Н., Федосова В.Д., Математическое обеспечение оценки опасности технологического процесса. // "Энергетика: экология, надежность, безопасность": Материалы 6-й Всеросс. науч.-техн. конф. - Томск: Изд-во ТПУ. 2000. Т. 1. - С. 221-224.

31. Сечин А.И., Сечин А.А. Экспериментальная установка для исследования горения плывоздушных смесей при пониженных давлениях. // "Энергетика: экология, надежность, безопасность": Материалы 7-й Всерос. науч.-техн. конф. - Томск: Изд. ТПУ, 2001. - Т.1. - С. 214-219.
32. Сечин А.И., Яшин В.Я. Влияние размера экспериментальной установки в предельных условиях воспламенения аэрозвесей. // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий: Материалы второй науч.-практ. конф. - Томск: Изд-во ТПУ, 2002. Т. 2. - С. 314-319.
33. Сечин А.И. Некоторые аспекты расчета критических условий распространения пламени в гибридных системах. // Технология органических веществ и высокомолекулярных соединений: Матер, регион, науч.-практ. конф. - Томск: Изд-во ТПУ, 2003, -С. 199-201.
34. Косинцев В.И., Сечин А.И., Цветков Д.А. К вопросу определения пожаро-взрывоопасных характеристик парогазовых смесей. // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий. Материалы науч.-практ. конф.: - Томск: Изд-во ТПУ, 2000. Т. 1. - С. 208-211.
35. Сечин А.И., Гуляев М.В. Исследования статической электризации порошкообразных веществ и эффективности средств защиты, // Химия и технология лекарственных препаратов и полупродуктов: Материалы науч.-практ. конф.: - Томск: Изд-во ТПУ, 2002, - С. 205-209.
36. Сечин А.И., Сечин А.А. Разработка безопасного метода гранулирования материалов. // "Энергетика: экология, надежность, безопасность": Материалы 8-й Всерос. науч.-техн. конф. - Томск: Изд. ТПУ, 2002. - Т.1. - С. 220-223.
37. Сечин А.И. К вопросу установления конструктивного соответствия технологического оборудования требованиям электростатической искробезопасности в производстве изоксазолкарбоновой кислоты. // "Энергетика: экология, надежность, безопасность": Материалы 6-й Всерос. науч.-техн. конф. - Томск: Изд-во ТПУ. 2000. Т. 1. - С. 244-246.
38. Сечин А.И., Гуляев М.В. Экспериментальная установка для исследования статической электризации порошкообразных веществ и эффективности средств защиты. // "Энергетика: экология, надежность, безопасность": Материалы 7-й Всерос. науч.-техн. конф. - Томск: Изд. ТПУ, 2001. Т.1. - С. 233-237.
39. Сечин А.И., Яшин В.Я. Влияние температуры нагрева источника зажигания на нижний концентрационный предел распространения пламени в аэрозвесах // Известия Томского политехнического университета, - Томск: 2003. Т. 306. № 6, - С. 45-48.