

МИНИСТЕРСТВО УКРАИНЫ ПО ВОПРОСАМ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ
СИТУАЦИЙ
АКАДЕМИЯ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ УКРАИНЫ

На правах рукописи

БОНДАРЕНКО СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

УДК 614.8

**РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРОВ ОГNETУШАЩЕГО АЭРОЗОЛЯ С
УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Специальность 21.06.02 – Пожарная безопасность

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Росоха Владимир Емельянович
кандидат психологических наук,
доцент

Харьков – 2004

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Раздел 1 Анализ средств автоматического пожаротушения в ограниченных объемах. Постановка задачи.....	10
1.1 Анализ современных средств объемного пожаротушения	10
1.1.1 Анализ современных огнетушащих веществ, используемых при объемном тушении	10
1.1.2 Анализ типовых рецептур аэрозолеобразующих составов и их характеристик	18
1.2 Анализ современных систем объемного пожаротушения ..	30
1.2.1 Особенности построения и функционирования систем объемного пожаротушения	30
1.2.2 Анализ схемных решений генераторов огнетушащего аэрозоля	39
1.3 Постановка задачи исследования и особенности ее решения	49
1.4 Выводы	51
Раздел 2 Моделирование рабочих процессов, протекающих в камере сгорания генератора огнетушащего аэрозоля	53
2.1 Обобщенная схема генератора огнетушащего аэрозоля. Основные допущения при моделировании рабочих процессов в камере генератора	53
2.2 Упрощенная математическая модель рабочих процессов в камере сгорания ГОА	57
2.2.1 Общие замечания к методу осреднения по свободному объему камеры генератора	57

2.2.2 Уравнения сохранения энергии, массы продуктов сгорания и уравнение состояния идеального газа для осредненных по свободному объему камеры генератора параметров газо-аэрозольной смеси.....	59
2.2.3 Система уравнений, описывающих изменение средних по объему физических параметров продуктов сгорания аэрозолеобразующего заряда.....	61
2.3 Система линеаризованных уравнений камеры сгорания генератора огнетушащего аэрозоля	64
2.4 Среднеобъемное давление и температура газоаэрозольной смеси в камере ГОА в установившемся режиме работы	68
2.5 Динамические характеристики генератора огнетушащего аэрозоля	77
2.5.1 Передаточная функция ГОА по давлению	77
2.5.2 Передаточная функция ГОА по температуре	81
2.5.3 Временные характеристики ГОА	83
2.5.4 Оценка длительности переходного процесса в камере сгорания ГОА	90
2.6 Выводы	95
Раздел 3 Исследование характеристик генератора огнетушащего аэрозоля	97
3.1 Исследование влияния геометрических размеров корпуса и свойств аэрозолеобразующего заряда генератора на величину массового расхода и скорость сгорания заряда АОС	97
3.2 Исследование длительности работы генератора огнетушащего аэрозоля	104
3.3 Исследование допустимого отношения между площадью поверхности горения заряда АОС и площадью выпускных отверстий	109

3.4 Оценка массы огнетушащего вещества, образующегося во время работы генератора	115
3.5 Имитационные модели характеристик ГОА.....	117
3.5.1 Имитационная модель длительности переходного процесса в камере сгорания ГОА	117
3.5.2 Имитационная модель длительности работы ГОА	127
3.5.3 Имитационная модель массового расхода в установившемся режиме	134
3.6 Выводы	140
Раздел 4 Экспериментальное исследование характеристик ГОА. Разработка рекомендаций по проектированию ГОА с улучшенными характеристиками	142
4.1 Задача, методика экспериментального исследования.....	142
4.2 Результаты экспериментальных исследований	147
4.3 Рекомендации по выбору схемы построения ГОА с минимальным временем работы при заданном массовом расходе	152
4.4 Выводы	166
Выводы	167
Список использованных источников	170
Приложения	184
Приложение А. Характеристики современных средств объемного пожаротушения	185
Приложение Б. Классификация генераторов огнетушащего аэрозоля	199
Приложение В. Результаты имитационного моделирования характеристик ГОА	210
Приложение Г. Результаты экспериментального исследования характеристик генераторов огнетушащего аэрозоля	221
Приложение Д. Акты внедрения	225

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Монреальская конвенция и ряд других международных соглашений, стали непреодолимым препятствием перед огнетушащими веществами, разрушающими озоновый слой атмосферы Земли. Украина так же не осталась в стороне от этого процесса. Поиск эффективной альтернативы экологически небезопасным хладагентам, привел к созданию принципиально нового средства — огнетушащего аэрозоля. Основным достоинством этого средства является высокая эффективность при тушении пожаров класса В и подкласса А2 в ограниченных объемах. Получают газо-аэрозольный состав путем сжигания специально подобранной аэрозолеобразующей композиции непосредственно в момент тушения пожара. Процесс получения аэрозоля протекает в камере сгорания генератора огнетушащего аэрозоля (ГОА).

Использование в качестве исполнительного элемента системы автоматического пожаротушения ГОА позволяет избавиться от ряда недостатков, присущих системам объемного пожаротушения: наличие баллонов или сосудов под давлением для хранения огнетушащего вещества; наличие магистральных и распределительных сетей трубопроводов для доставки огнетушащего вещества; значительная металлоемкость системы пожаротушения.

Ведущая роль в разработке и производстве как аэрозолеобразующих составов (АОС), так и генераторов, принадлежит российским предприятиям. В частности, АО "Гранит–Саламандра" (г. Москва), НПО им. С.М. Кирова (г. Пермь), НИИПХ (г. Сергиев Посад), ФЦДТ "Союз" (г. Дзержинский, Московская область), ИВЦ "Техномаш" (г. Пермь), ИЧП "Габар" (г. Москва), фирма "Эпотос+" (г. Москва), ООО "Озон–Пермь" (г. Пермь), СКТБ "Технолог" (г. Санкт-Петербург).

В Украине над созданием систем аэрозольного пожаротушения работают УкрНИИПБ МЧС Украины, СП "Паралакс", НПФ "Бранд–

Мастер" (г. Киев), ООО "Крайз" (г. Полтава), ООО "Проектный институт "Электропром", АГЗУ МЧС Украины (г. Харьков).

К разработке средств аэрозольного тушения проявляют интерес и зарубежные фирмы. Фирмой Kidde Walter (США) выполнен цикл экспериментальных исследований по тушению аэрозольными составами пожаров в двигателях и багажных отсеках самолетов. Фирма Dinamit Nobel (Германия) совместно с Люберецким НПО "Союз" (Россия) наладила выпуск аэрозольных генераторов для европейского потребителя. Фирмой Kidde Deugra (Германия) совместно с фирмой "Интертехнолог" (г. Санкт-Петербург) созданы рецептуры составов и ГОА, которые не дают высокотемпературного факела и токсичных продуктов горения.

Вопросы создания и совершенствования систем аэрозольного тушения освещены в работах А.Н. Баратова [16, 18], В.В. Агафонова [3–6], Н.П. Копылова [50–52], В.Н. Аликина [8–13], Д.А. Корольченко [53]. В их работах основное внимание уделяется решению следующих проблем: снижение пожарной опасности процесса получения огнетушащего вещества, выбора оптимальных схем размещения ГОА для обеспечения равномерного распределения аэрозоля в защищаемом объеме. Вопросам совершенствования характеристик ГОА, таких как продолжительность работы, быстродействие, интенсивность аэрозолеобразования, практически не уделяется внимания. Отсутствие математических моделей, которые связывали характеристики ГОА с параметрами заряда АОС, лишает возможности создавать новые модификации ГОА с заданными характеристиками. Поэтому задача создания математических моделей, которые позволили разрабатывать генераторы с улучшенными техническими характеристиками, например, по времени работы, массовому расходу, является весьма актуальной.

Связь с научными программами, планами, темами. Диссертационное исследование проводилось в рамках научно-исследовательской работы, выполняемой по заказу ГУГПО МВД Украины – №0199U004310.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является обоснование возможности создания генераторов огнетушащего аэрозоля с улучшенными динамическими характеристиками.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ процессов, протекающих в камере сгорания ГОА;
- построить математические модели, адекватно описывающие процессы, протекающие в камере сгорания ГОА;
- определить параметры заряда АОС, параметры генератора, обеспечивающие минимальное время работы ГОА при ограничениях, накладываемых на величину массового расхода огнетушащего вещества;
- создать экспериментальную установку для исследования динамических характеристик ГОА и разработать методику их определения;
- оценить адекватность полученных математических моделей;
- разработать рекомендации по проектированию ГОА с улучшенными характеристиками.

Объект исследования. Генератор огнетушащего аэрозоля и процессы, происходящие в камере сгорания во время его работы.

Предмет исследования. Характеристики и параметры генератора огнетушащего аэрозоля.

Методы исследований. В диссертационных исследованиях для разработки математической модели процессов, происходящих в камере сгорания ГОА, использованы методы математического моделирования, операционного исчисления, при проведении экспериментальных исследований использован метод теории планирования эксперимента; при обработке полученных экспериментальных данных и выведении эмпирических зависимостей использованы методы математической статистики и обработки данных, для расчета полученных математических моделей использован математический пакет “MathCAD Pro”.

Научная новизна полученных результатов. Научная новизна

полученных результатов состоит в том, что:

- впервые создан комплекс математических моделей, описывающих процессы протекающие в генераторе огнетушащего аэрозоля;
- впервые получен комплекс технических характеристик и параметров, применительно к ГОА улучшенного типа;
- впервые с использованием методов имитационного моделирования в сочетании с методами теории планирования эксперимента, получены зависимости массового расхода и длительности работы ГОА от: плотности, скорости и температуры горения заряда АОС и геометрических характеристик генератора;
- впервые на основе использования критерия минимума времени формирования огнетушащего вещества, решена задача по выбору параметров ГОА при ограничениях, накладываемых на параметры заряда АОС.

Практическое значение полученных результатов.

Комплекс математических моделей, описывающих рабочие процессы в ГОА, программы расчета их параметров, а так же рекомендации по проектированию генераторов являются научно-методической базой для разработки новых модификаций генераторов с усовершенствованными характеристиками.

Результаты исследований внедрены в НПФ "Бранд Мастер" (г. Киев) (акт от 17.08.04 г.), ООО "Крайз" (г. Полтава) (акт от 6.09.04 г.), ООО "ПИ "Электропром" (г. Харьков) (акт от 9.07.2004 г.) при разработке новых модификаций ГОА и оптимизации характеристик систем аэрозольного тушения, создаваемых для защиты различного рода объектов. Положительный эффект от результатов внедрения достигается вследствие сокращения времени создания необходимой огнетушащей концентрации на защищаемом объекте.

Полученные динамические модели ГОА используется в учебном процессе АГЗУ МЧС Украины при проведении занятий по дисциплинам:

«Пожарная и производственная автоматика» (Раздел 1, тема 1) и «Средства автоматической противопожарной защиты» (Раздел 1, тема 1) (акт от 09.03.04 г.)

Личный вклад соискателя состоит в проведении анализа схемных решений современных модификаций ГОА с определением основных направлений по совершенствованию их характеристик, в обосновании возможности применения нульмерного метода при математическом описании процессов, происходящих в ГОА, обосновании варианта компоновки заряда АОС, который обеспечивает минимальное время работы ГОА при максимальном массовом расходе огнетушащего аэрозоля.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на III научно-практической конференции "Пожежна безпека" (г. Киев, 1997 г.), XV научно-практической конференции "Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков" (г. Москва, 1999 г.), XVI научно-практической конференции "Крупные пожары: предупреждение и тушение" (г. Москва, 2001 г.), Международной научно-практической конференции «Проблемы пожарной безопасности. Ликвидация аварий и их последствий» (г. Донецк, 2002 г.), VI научно-практической конференции «Пожарная безопасность» (г. Харьков, 2003 г.), научно-практической конференции «Наглядно-профілактична діяльність в МНС» (г. Харьков, 2004 г.) на научно-технических семинарах АГЗУ МЧС Украины.

Публикации. Основные научные положения и результаты исследований опубликованы в 9 научных статьях, 6 из которых в изданиях, включенных в перечень ВАК Украины, в 7 тезисах докладов научно-технических и научно-практических конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, общих выводов и приложений. Полный объем диссертации включает 232 страницы, 71 рисунок, 42 таблицы, 128 наименований использованных источников.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ В
ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЪЕМАХ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Анализ современных средств объемного пожаротушения

1.1.1. Анализ современных огнетушащих веществ, используемых при
объемном тушении

Любой пожар, который вовремя не обнаружен и не ликвидирован, наносит непоправимый ущерб экономике любого предприятия, загрязняет окружающую среду, а иногда может привести к человеческим жертвам. Потому так важно не только зафиксировать место возникновения пожара, но и принять меры по его наискорейшей ликвидации.

Для объектов, имеющих ограниченные пространства, наиболее эффективным является объемный способ тушения. Под объемным пожаротушением обычно понимают такой способ тушения, при котором огнетушащие средства равномерно распределяются во всем объеме помещения [38]. Для его реализации необходимы такие средства, которые могут распределяться в атмосфере защищаемого объема и создавать в каждом его элементе огнетушащую концентрацию.

При реализации объемного способа пожаротушения используются следующие огнетушащие вещества [54]:

- вода или специальные растворы на её основе;
- газовые составы;
- огнетушащие порошки;
- огнетушащие аэрозоли.

Достоинствами воды как огнетушащего вещества являются ее доступность и дешевизна, относительно высокая удельная теплоемкость, высокая скрытая теплота испарения, химическая инертность по отношению к большинству веществ и материалов. Для повышения

огнетушащей способности применяют тонкораспыленную воду со средним размером капель порядка $50 \div 100$ мкм [124, 125]. Эффективность её определяется двумя факторами: охлаждением горящих поверхностей и предотвращением поступления кислорода к горящему объекту. Среди положительных аспектов данного огнетушащего вещества можно отметить: ускоренный процесс тушения, малая опасность повторного воспламенения, снижение расхода воды, не токсичность огнетушащего вещества, снижение опасности отравления газом [113, 118]. В качестве недостатков нужно отметить следующее:

- узкий диапазон температур эксплуатации;
- высокая электропроводность;
- плохая адгезия с горячей поверхностью.

До недавнего времени наилучшей огнетушащей способностью среди газовых огнетушащих составов обладали галогеносодержащие углеводороды [26, 29], так называемые хладоны (международное название – галоны). Но из-за пагубного воздействия на озоновый слой атмосферы Земли, согласно решений ряда международных форумов, эти вещества постепенно изымаются из обращения [111, 114, 116, 119, 122, 123, 126]. В качестве альтернативных веществ, предлагаются различные составы, которые в зависимости от механизма тушения можно разбить на две классификационные группировки:

- инертные разбавители, снижающие содержание кислорода в зоне горения и образующие инертную среду (двуокись углерода, азот, аргон и их смеси);
- ингибиторы, тормозящие процесс горения (галоидоуглеводороды и их смеси с инертными газами).

Среди инертных разбавителей самой популярной является двуокись углерода CO_2 . Нормативная огнетушащая концентрация этого вещества для различных материалов изменяется в пределах от 30,9 % до 35,7 %

(табл. А.1.1). Недостатками углекислоты, как огнетушащего вещества, является следующее:

- в объеме, где создана огнетушащая концентрация вещества, не может находиться ни один живой организм;
- выброс CO_2 в больших количествах приводит к "парниковому" эффекту;
- при тушении электронной аппаратуры, воздействие огнетушащего вещества может вызвать "холодный шок" [94].

Следующие инертные газы получают непосредственно из воздуха. Для тушения используется только необходимая концентрация [93]. Для тушения с использованием азота концентрация изменяется в пределах от 27,8 % до 36 % для различных веществ (табл. А.1.2), для аргона в пределах от 36,1 % до 46,8 % (табл. А.1.3). Поэтому вредное воздействие на людей и окружающую среду исключено. Хранятся эти вещества преимущественно в газообразном состоянии. Азот главным образом применяется в стационарных установках пожаротушения для тушения натрия, калия, бериллия и кальция. Для тушения магния, лития, алюминия, циркония применяют аргон [109].

В качестве состава, при разработке которого учтены токсические свойства инертных разбавителей, фирмой Ansul (США) предложена смесь газов под названием Инерген (IG-54). Она состоит на 52% из азота N_2 , 40% – аргона Ar , 8% – CO_2 [112]. Значения нормативной огнетушащей концентрации газового состава представлены в табл. А.1.4. В случае срабатывания установок, заряженных этим газом, содержащееся кислорода в воздухе снижается с 21% до 13-12%, таким образом, ликвидируется пожар. Но как отмечается в [93], в качестве тушащего агента целесообразно применять чистые инертные газы, так как процесс получения тушащего вещества в виде смесей инертных газов усложняет и удорожает его производство, а тушащие характеристики чистой двуокиси углерода и чистого азота лучше, чем тушащие характеристики смесей инертных газов (рис. 1.1).

Следующий газ, который обладает высокими диэлектрическими свойствами, получил название элегаз. Он выпускается в Российской Федерации. Элегаз имеет формулу SF_6 (шестифтористая сера) и по механизму воздействия на пламя относится к инертным разбавителям. НПБ 22–96 рекомендует его к применению в качестве огнетушащего вещества в установках газового пожаротушения.

Термическое разложение молекулы газа начинает осуществляться при температуре свыше 1100°C , главным образом при 2000°C [87]. Элегаз не токсичен, имеет самую низкую, в сравнении с другими инертными газами, огнетушащую концентрацию при тушении н-гептана, которая составляет 10 %. Для тушения других горючих материалов его концентрация может меняться от 7.2 % до 14.4 % (табл. А.1.5)

В качестве замены запрещенным хладагентам марок 13B1, 114B2 предложены следующие газы [110, 127, 128]:

- хладон 227ea ($\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$, FM200);
- хладон 125 ($\text{C}_2\text{F}_5\text{H}$, пентафторэтан);
- хладон 318Ц ($\text{C}_4\text{F}_8\text{Ц}$, октафторциклобутан);
- хладон 218 (C_3F_8 , перфтордекалин);
- хладон 23 (CF_3H).

Газовое соединение FM200 (HFC 227ea) [115, 117] производства Great Lakes Chemical Corporation (США) имеет следующие достоинства:

- значительная скорость тушения (до 10 с);
- отсутствие проводимости электрического тока;
- тушение без остатков тушащего вещества.

Огнетушащая концентрация данного вещества для различных горючих материалов составляет около 7% (табл. А.1.6)

Однако некоторые источники [93] располагают следующими данными: FM200 синтетический газ и может находиться в атмосфере от 1 до 30 лет; при воздействии газа на организм человека, отмечено бесконтрольное повышение пульса и рост концентрации газа в крови.

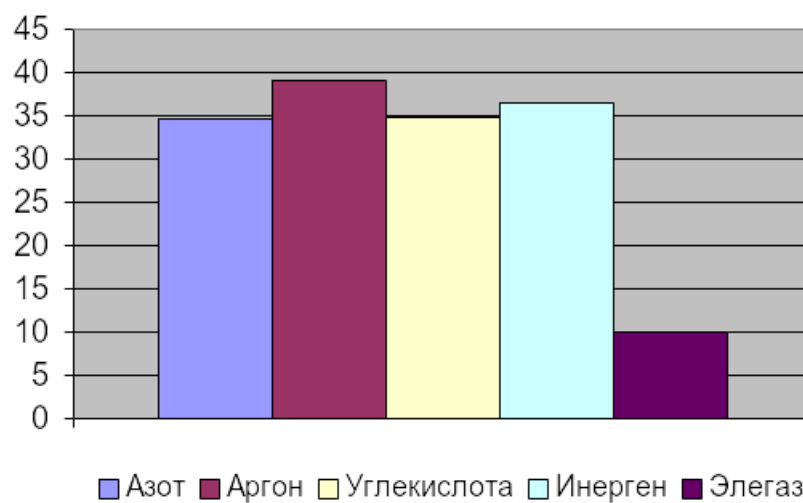


Рис. 1.1. Объемные огнетушащие концентрации в % (об.) инертных разбавителей для тушения н-гептана

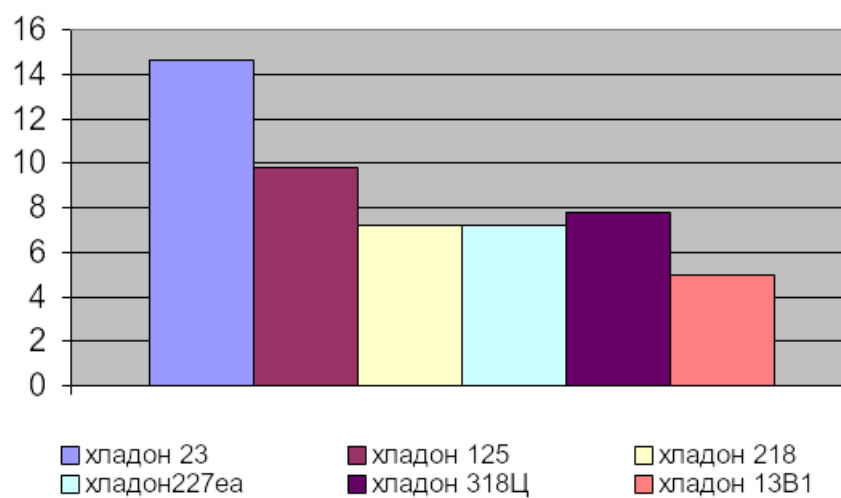


Рис. 1.2. Объемные огнетушащие концентрации в % (об.) ингибиторов горения для тушения н-гептана

В Российской Федерации налажен выпуск хладона 125 (международное название HFC 125). Он характеризуется следующими значениями огнетушащих концентраций (табл. А.1.7).

Его токсическое действие близко к показателям хладона 13В1, как показали исследования [119] гибель подопытных животных происходит при концентрации газа более 70 %. Вместе с тем минимальная концентрация, при которой наблюдается негативное воздействие газа, составляет 10 %.

Еще один газовый состав, выпускаемый в России, хладон 318Ц. Он характеризуется достаточно низкой огнетушащей концентрацией при тушении легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (табл. А.1.8). Предельно-допустимая концентрация октафторциклобутана в воздухе составляет $3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$.

Для тушения н-гептана с использованием хладона 218 потребуются создать огнетушащую концентрацию вещества такую же, как и при тушении с использованием хладона 227еа (табл. А.1.9). А при тушении толуола с помощью данного состава потребуется из всех рассмотренных хладонов самая низкая концентрация 5,4 %.

Как показывает анализ (рис. 1.2) новые озонобезопасные хладоны незначительно уступают по огнетушащей эффективности хладону 13В1, но при этом превосходят по этому показателю в $3 \div 4$ раза инертные разбавители (см. рис. 1.1).

Вместе с тем, одним из важных недостатков большинства галоидосодержащих газовых составов есть способность образовывать во время взаимодействия с пламенем или контакта с раскаленной поверхностью чрезвычайно вредные побочные продукты термического разложения (COF_2 , CO), а при наличии влаги – HF . Фтороводород – едкий газ, имеющий высокую коррозионную активность.

Рассмотрев особенности механизма огнетушащего действия современных газовых огнетушащих составов, можно сделать следующий

вывод касательно ограничений по области применения этих веществ. Огнетушащие газы не следует применять для тушения пожаров [66]:

- волокнистых, сыпучих, пористых и других горючих материалов, склонных к самовозгоранию и (или) тлению внутри объема вещества (древесные опилки, хлопок, травяная мука и др.);
- химических веществ и их смесей, полимерных материалов, склонных к тлению и горению без доступа воздуха;
- гидридов металлов и пирофорных веществ;
- порошков металлов (натрий, калий, магний, титан и др.).

В качестве альтернативы хладагентам могут служить порошковые составы, которые экологически безопасны и имеют достаточно высокую огнетушащую способность. Они представляют собой мелкоизмельченные минеральные соли с различными добавками [17]. Основой для огнетушащих порошков являются фосфорно-аммонийные соли, карбонат и бикарбонат калия, хлорид калия. Механизм огнетушащего действия порошков в основном заключается в ингибировании реакции горения в результате связывания активных центров цепных реакций, протекающих в пламени.

Однако, выпускаемые грубодисперсные порошки (величина фракции от 40 до 80 мкм) трудно распределить по защищаемому объему, они малоэффективны при объемном способе тушения. Увеличение дисперсности порошков при существующих способах их получения и применения резко снижает эксплуатационные свойства (увеличивается гигроскопичность, склонность к коагуляции), что затрудняет их использование в установках объемного пожаротушения.

В последние годы в установках объемного пожаротушения начинает широко внедряться новое высокоэффективное, экологически чистое вещество — огнетушащий аэрозоль, который представляет собой смесь инертных газов, высокодисперсных солей и окислов щелочных металлов. Смесь этих продуктов обладает высокой огнетушащей способностью по

отношению к углеводородным пламенам (табл. А.1.10). Поэтому в ряде случаев эти средства могут рассматриваться как альтернатива озоноразрушающим хладонов 114В2 и 13В1 [16].

Основной отличительной особенностью нового вещества является способ его получения. Он заключается в сжигании при определенных условиях специальной композиции, которая в общем случае состоит из окислителя и горючего—связующего. Как правило, в качестве окислителя выступают содержащие калий неорганические соединения, а роль связующего выполняют органические или неорганические восстановители. В результате сгорания твердотопливных композиций генерируется газоаэрозольный состав, газовая фаза которого состоит преимущественно из N_2 и CO_2 , а твердая фаза содержит K_2CO_3 , $KHCO_3$, KCl [5]. При этом твердая фаза по своему воздействию на пламя во многом подобна огнетушащим порошкам, обладая, однако, существенно более высокой эффективностью благодаря высокой дисперсности (характерный размер частиц составляет около 1 мкм [16]). Благодаря малому размеру частиц огнетушащего вещества резко повышается эффективность тушения пожара, как за счет их высокой удельной поверхности, так и в силу их малого объема, облегчающего их значительный прогрев и газификацию в пламени. Температура образовавшегося аэрозоля достигает сотен градусов [57], он конвективным потоком всплывает под потолок защищаемого помещения и по мере охлаждения начинает равномерно распределяться в объеме помещения [18, 22]. Это позволяет отнести рассматриваемый способ тушения к объемному, тем более что из-за высокой дисперсности твердой фазы оседание ее частиц реализуется за достаточно длительное время.

Таким образом, механизм объемного аэрозольного пожаротушения определяется следующими основными явлениями [104]:

- АОС образуют большое количество инертных газов, что вызывает снижение содержания кислорода и реакционной способности горючей

смеси в объеме;

- свежее образовавшиеся неспассивированные высокодисперсные твердые частицы, например, соединений калия обладают более высокой химической активностью и эффективно ингибируют газовые пламена;
- твердые частицы, имеющие размеры в 10-100 раз меньше, чем порошки, обладают более высоким теплопоглощением (при попадании в зону горения), что существенно влияет на температуру пламени;
- аэрозольные смеси имеют более высокие, чем порошки, показатели стабильности создаваемых концентраций (низкая скорость оседания частиц) и проникающей способности (при распределении в труднодоступные, "теневые" зоны защищаемого объема).

Анализ характеристик огнетушащих веществ, традиционно применяемых при объемном способе тушения, показал что, большинство веществ имеет низкую огнетушащую способность в сравнении с хладоном 13В1. Однако, огнетушащий аэрозоль, получаемый при сжигании заряда АОС, при тушении пожаров класса В, подкласса А2 превосходит по огнетушащей эффективности традиционные средства объемного тушения в $4 \div 5$ раз.

1.1.2. Анализ типовых рецептур аэрозолеобразующих составов и их характеристик

В настоящее время разработано и продолжает разрабатываться значительное количество аэрозолеобразующих огнетушащих составов (АОС).

Принципиальная возможность использования для объемного пожаротушения аэрозолеобразующих составов обоснована в работах [43, 44]. Дальнейшие исследования, проведенные НИИПХ совместно с ВНИИПО в 1984 – 1990 гг., показали, что системы на основе

аэрозолеобразующих составов действительно могут быть альтернативой системам пожаротушения, где в качестве огнетушащего вещества выступает хладон [14, 58, 59, 121].

В работах [105, 106] показано, что нашатырно–антраценовые смеси и металл–хлоридные дымовые смеси обладают крайне низкой огнетушащей эффективностью. Наиболее высокой огнетушащей способностью обладают пиротехнические огнетушащие составы на основе фосфора. Однако, вследствие высокой температуры их горения, сильного коррозионного воздействия продуктов сгорания и их токсичности широкое использование этих составов для целей пожаротушения не представляется возможным.

В НИИПХ и СКТБ "Технолог" (г. Санкт–Петербург) совместно с ВНИИПО разработан ряд пиротехнических аэрозолеобразующих составов, на основе нитратов, хлоратов, перхлоратов щелочных и щелочноземельных металлов с различными органическими соединениями, для объемного тушения – самоактивирующихся тушащих композиций (СТК) [6, 21, 51]. При горении этих составов образуется аэрозоль, его конденсированная фаза в основном состоит [50] из частиц оксида, гидрооксида и солей калия размером от 0,4 до 4,0 мкм, газовая фаза из азота, диоксида углерода и паров воды. Как отмечено в работе [91], в целом огнетушащий эффект аэрозолей пиротехнических составов основан на ингибирующем, флегматизирующем, охлаждающем и кислородосвязывающем механизмах действия.

Испытания пиротехнических аэрозолеобразующих составов [92] показали, что огнетушащая концентрация состава примерно в 4 раза меньше, чем хладона 114В2 и составляет 0,02 – 0,18 кг/м³, температура горения 800÷1000°С, дымообразующая способность 95÷98%, газопроизводительность 0,32÷0,34 л/г. Химический анализ дисперсной фазы аэрозоля состава СТК 51–35–1 [52]: K₂CO₃ 1.5H₂O – 52,7%, NH₄HCO₃ – 25,7%, KHCO₃ – 8,2%, KNO₂ – 7,9%, другие соединения калия – 5,5 %.

К достоинствам пиротехнических составов, таких как, СТК–5–14 и СТК–5–2,5Д разработки СКТБ "Технолог" совместно с ВНИИПО, как считают авторы работы [90], относятся: широкая сырьевая база, низкая стоимость, малая чувствительность к механическим и тепловым воздействиям, хорошая воспламеняемость и устойчивый режим горения.

В качестве нового огнетушащего вещества ОАО "Гранит–Саламандра" (г. Москва) предложен пиротехнический состав Е–1, содержащий помимо окислителя эпоксидную смолу и до 10% магния [58].

В КГТУ (г. Казань) проводятся работы по разработке пиротехнических составов с улучшенными характеристиками, в частности, для замены состава Е–1 [59]. Для улучшения технологических и экономических показателей в качестве горючего–связующего вместо эпоксидной смолы использована фенолформальдегидная смола (идитол), что позволило исключить операцию форполимеризации перед прессованием состава, решить проблему его живучести и обеспечить требуемый уровень механической прочности шашек. Прессованный состав СП–33, включающий композицию из хлората калия, нитрата калия, дициандиамида, имеет в 1,4 раза меньшую температуру горения, в 1,2 раза большую концентрацию тушащих пламя агентов и меньшую чувствительность к механическим воздействиям по сравнению с составом Е–1. Для повышения эффективности в состав может вводиться до 1% иодида аммония.

Однако пиротехнические составы и изделия из них, изготавливаемые методом глухого прессования, имеют определенные недостатки [86], такие как технологическая опасность производства, гигроскопичность и недостаточный уровень физико-механических характеристик составов, что ограничивает их применение [90] в условиях с большим перепадом температур ($\pm 50^{\circ}\text{C}$), с высокой влажностью (до 100%) и условиях транспортирования в составе объектов, испытывающих воздействие интенсивных знакопеременных нагрузок.

Некоторых из перечисленных недостатков лишены аэрозольобразующие составы, изготавливаемые методом проходного прессования. Такие составы разрабатываются, в частности, в СКТБ "Технолог" [21, 90] и ФЦДТ "Союз" (г. Дзержинский, Московской обл.) [59, 86].

Для повышения прочностных характеристик в составах типа СБК разработки СКТБ "Технолог" использованы каучуки: дивинилстирольный – ДСТ, бутадиен-нитрильный – СКН, бутадиеновый – СКБ в смеси с натуральным – НК. Уменьшение конденсированного остатка, остающегося после сгорания этих составов, и повышение огнетушащей эффективности достигаются добавлением в состав дополнительно к нитрату калия перхлората калия (СБК–2) и продукта К–1 (СБК–1), которые при разложении выделяют дополнительное тепло и свободный кислород, что интенсифицирует процесс горения. Основными компонентами огнетушащего аэрозоля, образующегося при сгорании состава СБК–2, являются [4]: K_2CO_3 , $KHCO_3$, KCl , N_2 , CO_2 . Огнетушащая концентрация состава 0,027 – 0,056 кг/м³. Безопасное время пребывания человека в помещении при концентрации аэрозольной смеси 0,030 кг/м³ составляет 15 мин., при концентрации 0,100 кг/м³ — 5 мин.

На основании экспериментальных данных подтверждены преимущества составов типа СБК по сравнению с пиротехническими:

- более высокая плотность изделий, позволяющая иметь (при одинаковой огнетушащей эффективности) более короткие (на 15%) и соответственно легкие заряды АОС;
- высокие прочностные характеристики, в том числе высокая виброустойчивость;
- пониженная (в 2 – 4 раза) гигроскопичность;
- широкий диапазон скоростей горения для обеспечения необходимой интенсивности подачи огнетушащего аэрозоля;

- отсутствие особых требований по дисперсности компонентов, что определяется характером технологического процесса изготовления.

В РХТУ им. Д.И. Менделеева разработаны высокоэффективные составы [46] на основе пластифицированной нитроцеллюлозы и нитрата калия, характеризующиеся высокой огнетушащей эффективностью 11 – 14 г/м³. Скорость горения при атмосферном давлении составляет 3,5 мм/с. В ФЦДТ "Союз" разработаны составы баллиститного типа с применением в качестве горючего связующего пластифицированной нитроцеллюлозы [70, 71, 73]. В табл. А.1.11 приведены рецептуры таких составов. В качестве пластификаторов нитроцеллюлозы могут применяться динитроэтиленгликоль или триацетин.

Преимуществами по сравнению с пиротехническими и баллиститными составами, особенно в части регулирования физико-механических характеристик, обладают и смесевые аэрозолеобразующие огнетушащие составы. Они представляют собой резиноподобный материал благодаря наличию в рецептуре в качестве горючего связующего пластифицированных синтетических каучуков или смол.

Смесевые составы, перерабатываемые по широко освоенной на предприятиях технической химии литьевой технологии, и изделия на их основе разработаны и изготавливаются в ФЦДТ "Союз" [67, 68], НПО им. С.М. Кирова (г. Пермь) [9, 10, 13, 55], РХТУ им. Д.И. Менделеева [102]. При этом каждая организация использует свой имеющийся опыт и возможности по работе с тем или иным видом сырья, по компоновке рецептур и технологии изготовления составов, проектированию различного типа зарядов. Это обуславливает разнообразие характеристик аэрозолеобразующих составов. Примеры рецептур таких составов приведены в табл. А.1.12.

В РХТУ им. Д.И. Менделеева разработаны литьевые аэрозолеобразующие составы на основе нитрата калия и активных горючих связующих [102]. Они характеризуются относительно высокой

скоростью горения (до 10 мм/с) и достаточно низкой температурой горения ($1400 \div 1600$ К).

Созданные в ФЦДТ "Союз" при участии ВНИИПО смесевые твердотопливные составы типа ПАС [59, 86], имеют низкую чувствительность к удару и трению, относительно высокие температуры начала интенсивного разложения и вспышки (более 300°C), недетонационноспособны. Они обладают высокой огнетушащей эффективностью $0,02 \div 0,06$ кг/м³, низким влагопоглощением $0,1 \div 0,3\%$.

В НПО им. С.М. Кирова синтезированы рецептуры смесевых АОС с повышенным уровнем токсикологической безопасности [13, 77, 78]. В этих составах роль окислителя играет перхлорат калия (табл. А.1.12). Основным продуктом сгорания составов на его основе является хлорид калия (табл. А.1.13), являющийся эффективным огнетушащим веществом, основой для производства огнетушащих порошков и характеризующийся отсутствием на него предельно допустимых концентраций. В качестве основного связующего выбран каучук марки ПДИ – ЗАК (см. табл А.1.12), характеризующийся хорошими физико-механическими характеристиками составов на его основе в широком температурном диапазоне. В качестве пластификатора использовано трансформаторное масло. Наряду с составом на базе перхлората калия, на предприятии разработан состав АОС на основе нитрата калия – рецептура №2 (см. табл. А.1.12). Он характеризуется пониженной термодинамической температурой продуктов сгорания и отсутствием коррозионной активности к металлам. Устойчивое горение состава при атмосферном давлении возможно только при наличии в составе до 30 % горючего. В качестве горючего связующего применен пластифицированный трансформаторным маслом бутилкаучук [9], а тонко измельченный идитол играет роль дополнительного горючего [96].

В состав продуктов сгорания смесевых АОС традиционно входят инертные газы и ингибиторы (табл. А.1.13).

В табл. А.1.13 приведен состав продуктов сгорания смесевых

составов. Из приведенных данных следует, что АОС НПО им. Кирова рец. №1 превосходит остальные по газопроизводительности, составу продуктов сгорания, он имеет минимальное количество токсичных компонентов, отсутствует ПДК на основной ингибитор.

Необходимо отметить, что в отличие от большинства аэрозолесобразующих составов, продукты сгорания которых при взаимодействии с влагой образуют сильную щелочную среду [50], продукты сгорания АОС рец.1 таким свойством не обладают.

Важнейшим показателем всех средств объемного пожаротушения является огнетушащая способность, т. е. способность определенной по величине массовой или объемной концентрации огнетушащего вещества предотвращать воспламенение взрывоопасной газопаровоздушной смеси либо подавлять диффузионное горение в единице защищаемого объема.

На рис. 1.3 и 1.4 приведены экспериментальные данные по областям распространения пламени смесей метана и водорода с воздухом в присутствии огнетушащего аэрозоля ряда модификаций АОС [5]. Из полученных данных следует, что флегматизирующая концентрация серийных АОС (СТК-2МД, ПАС, ПТ, СБК) для гомогенных метано- и водородовоздушной смесей составляет соответственно 40 – 55 и 240 – 280 г/м³, что примерно в 5–6 раз ниже, чем для хладонов, и в 3–5 раз ниже, чем для наиболее эффективных опытных образцов порошков. Следует отметить, что значения "пиковых" флегматизирующих концентраций смещены в область "бедных" горючих смесей, что свидетельствует о существенном влиянии охлаждающих свойств огнетушащих аэрозолей АОС на параметры воспламенения и горения газовых смесей.

Из данных табл. А.1.14 следует, что минимальная величина огнетушащей концентрации большинства характерных огнетушащих АОС для подавления диффузионных газовых пламен горючих жидкостей, газов и твердых материалов в атмосфере воздуха в 5-8 раз ниже по сравнению с эффективным хладоном 114В2. Составы СТК-5-1 и СТК-24МФ,

используемые для получения охлажденных малоопасных аэрозолей, имеют низкую газопроизводительность, содержат более крупные частицы, а степень превращения массы исходного заряда АОС в огнетушащий аэрозоль составляет, соответственно, 88 и 52 % масс.

Сравнительный анализ огнетушащих концентраций аэрозолеобразующих составов показал, что смесевые составы не уступают по огнетушащей эффективности пиротехническим составам.

Таким образом, чем выше такие показатели, как степень превращения АОС в аэрозоль, газопроизводительность, содержание азота, углекислого газа в газовой фазе, дисперсность твердых частиц, тем выше огнетушащая эффективность. Наиболее эффективны твердые частицы оксидов, гидрооксида и углекислых солей калия.

Соотношение твердой и газовой фаз по массе, при котором для различных рецептур АОС обеспечивается максимальная огнетушащая эффективность получаемого аэрозоля, составляет 50/50 – 40/60. Изменение величины соотношения в сторону увеличения или уменьшения приводит к снижению огнетушащей эффективности АОС. Это обусловлено, с одной стороны тем, что образуемое большое количество инертных газовых разбавителей (за счет уменьшения количества твердых частиц) обладает значительно более низкой огнетушащей способностью по сравнению с твердыми частицами, что и определяет в этом случае снижение огнетушащей эффективности. С другой стороны, увеличение выхода в аэрозоль большого количества частиц (за счет уменьшения газопроизводительности) приводит к существенному росту их концентрации, что вызывает значительную коагуляцию, рост размеров частиц, оседание и в итоге — снижение огнетушащей способности АОС.

При неполном окислении продуктов реакции между компонентами АОС заметно уменьшается количество получаемого аэрозоля, а в его составе содержится дополнительно некоторое количество горючих веществ (C , CO , H_2 , CH_4), в том числе веществ, обладающих повышенной

токсичностью, например CO , HCN , N_xO_y , KCN . Это приводит не только к снижению показателей огнетушащей способности, но и к ухудшению экологической безопасности АОС.

Токсичность огнетушащих аэрозолей, образуемых при сгорании зарядов АОС, определяется главным образом их химическим составом (газовой и твердой фаз), дисперсностью твердых частиц и временем воздействия. Применяемые для пожаротушения аэрозоли термически достаточно стабильны, а продукты их возможного термического разложения (K_2O , CO_2) незначительно отличаются по токсичности от компонентов подаваемого для тушения аэрозоля.

Основными характеристиками токсичности аэрозольных продуктов горения АОС являются время безопасного пребывания человека без средств защиты в огнетушащей среде $t_{\text{доп}}$ в течение которого в организме не возникает необратимых изменений, и показатель токсичности HCL_{50} – отношение количества состава к единице объема замкнутого пространства (г/м^3), в котором образующиеся при горении аэрозольные продукты (смесь газообразных и твердых веществ) вызывают гибель 50 % подопытных животных. В соответствии с величиной показателя HCL_{50} огнетушащих аэрозолей АОС устанавливается класс их опасности. Класс опасности АОС определяется по стандартной методике при различном времени экспозиции (табл. А.1.15).

При использовании рецептур нестехиометрического соотношения компонентов, "обогащенных" по горючим компонентам, в аэрозолях содержится опасное количество токсичных веществ. Аэрозоли АОС на основе перхлоратов калия менее токсичны, чем аэрозоли составов на основе нитрата калия. Во всех указанных случаях токсичность аэрозолей возрастает при использовании АОС на основе крупнодисперсных (более 160 мкм) компонентов, а также в случае его охлаждения. Поэтому охлажденный огнетушащий аэрозоль содержит в 1,5-5 раз больше токсичных веществ (CO , NH_3 , Cl , N_xO_y).

В табл. А.1.15 приведены данные о токсичности огнетушащих аэрозолей типовых составов АОС, получаемых при сжигании зарядов.

На диаграмме (рис. 1.5) приведена сравнительная характеристика токсичности огнетушащего аэрозоля АОС марки СБК-2 и других огнетушащих составов – хладонов 114В2 и 13В1, азота, углекислого газа и порошка ПСБ-3. Необходимо отметить, что для большинства веществ огнетушащая концентрация превосходит значение, допускающие пребывание в этой среде персонала, без средств индивидуальной защиты. Негативный эффект от воздействия огнетушащего аэрозоля на человека в большей степени обусловлен чрезвычайно малыми размерами частиц, которые попадая в организм при вдохе могут вызвать заболевание дыхательных органов.

Коэффициент относительного озоноразрушающего действия (КОД), методика определения которого разработана в Институте энергетических проблем химической физики РАН, показатель, характеризующий сравнительную потенциальную способность огнетушащего аэрозоля АОС разрушать озоновый слой Земли, по сравнению с хладоном 11.

С учетом того, что твердые частицы огнетушащего аэрозоля, представляют собой различные соединения калия или натрия, имеют достаточно высокую растворимость в воде, попадая в тропосферу служат центрами конденсации влаги и вымываться с дождями на поверхность Земли. КОД твердых частиц огнетушащего аэрозоля АОС принимается равным 0.

Из газообразных соединений наиболее озоноопасными являются NO_x и HCN . Огнетушащие аэрозоли различных составов АОС, содержащие указанные соединения в количествах не более, соответственно, 10^{-1} и 10^{-3} % об., практически озонобезопасны, а значение КОД для таких АОС составляет не более 10^{-6} (табл. А.1.15).

Анализ данных о скорости и характере коррозии металлических образцов при воздействии на них аэрозолей с концентрацией в 3–4 раза

превышающую огнетушащую, свидетельствует о их сравнительно низкой активности. Что допускает применение огнетушащих аэрозолей для тушения электронного оборудования с сохранением его работоспособности.

Испытания составов СТК-24МФ, МГИФ, СТК-20МД, СБК, ПАС и Е-1 [5, 6] показали, что все перечисленные модификации АОС в количествах, равных примерно 2-3 минимальным значениям огнетушащих расходов, могут успешно применяться для тушения горящих электрооборудования и аппаратуры под напряжением до 1000 В.

При хранении, транспортировании и эксплуатации АОС в них могут происходить заметные физические и химические изменения вследствие внешних воздействий (климатических, механических и др.).

Физические изменения в АОС (набухание, появление трещин, изменение размеров, формы, плотности зарядов, растворение и испарение части компонентов и т. п.) чаще всего могут быть вызваны воздействием на них влаги, резкого изменения температуры окружающей среды и/или механического воздействия.

Химические изменения (изменение компонентного состава рецептур, повышение или понижение химической активности отдельных компонентов и др.) чаще всего связаны с пассивацией (образованием окисных пленок) и разложением компонентов при наличии в них некоторых примесей, влаги, а также в результате протекания обменных реакций между компонентами (особенно часто при повышенной влажности и температуре).

В зависимости от характера физико-химической стойкости АОС устанавливаются максимально допустимые условия и сроки хранения, транспортирования и эксплуатации.

В табл. А.1.17 приведены данные о допустимых условиях и сроках хранения и эксплуатации зарядов характерных типовых АОС без учета

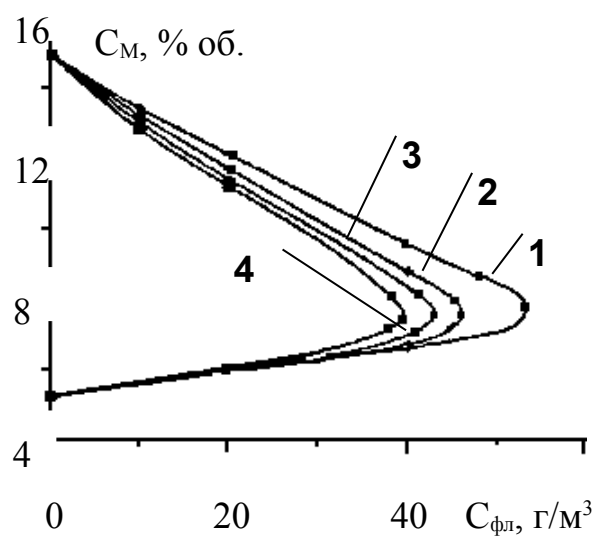


Рис. 1.3. Область распространения пламени по метановоздушной смеси в присутствии аэрозолей АОС: 1 – СТК-2МД; 2 – ПАС-11; 3 – СБК-2; 4 – ПТ

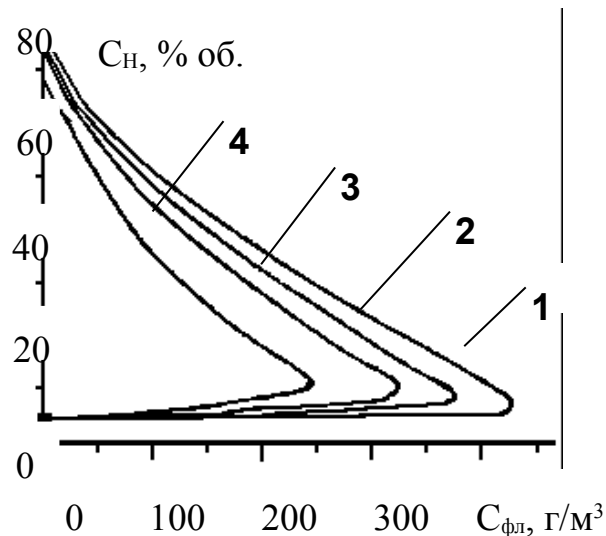
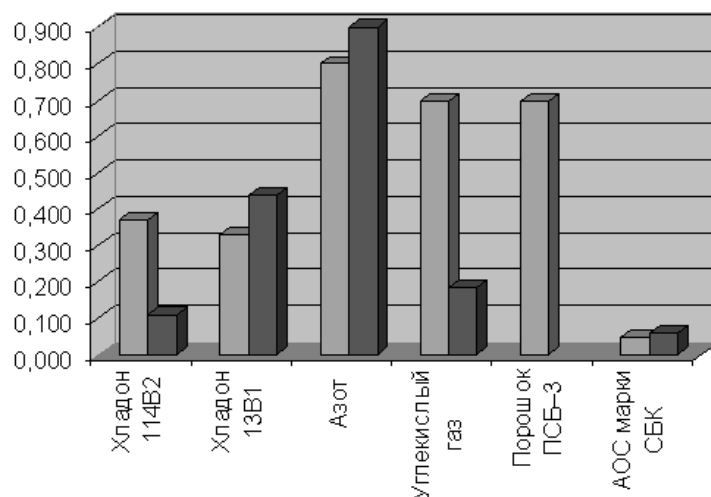


Рис. 1.4. Область распространения пламени по водородовоздушной смеси в присутствии аэрозолей АОС: 1 – СТК-5-2; 2 – СТК-5-3; 3 – СТК-2МД; 4 – СБК-2



■ Огнетушительная концентрация, кг/м куб.
 ■ Безопасная концентрация ОТВ для человека (без средств защиты), кг/м куб.

Рис. 1.5. Сравнительные показатели токсичности существующих средств объемного пожаротушения

проведения возможных специальных защитных мероприятий. На основании этих данных можно сделать вывод о том, что у стехиометрических составов срок эксплуатации ниже. Однако, широкий температурный диапазон позволяет применять заряды АОС для защиты и не отапливаемых помещений.

В табл. А.1.18 приведены значения показателей прочности в диапазоне температур от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$ при испытании на сжатие и растяжение для зарядов характерных модификаций АОС, изготавливаемых по различным технологиям. Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что прочностные характеристики серийно выпускаемых зарядов сравнимы с аналогичными показателями твердых веществ и материалов.

По данным опытов [5] заряды СБК, ПАС, ТТК, ПТ, Е-1 успешно выдержали испытания при частоте синусоидальных колебаний до 2000 Гц (амплитуда виброперемещений 2,5 мм, амплитуда виброускорения 2g). Что позволяет использовать их для защиты транспортных средств и вибронпряженных объектов.

Таким образом, при обосновании выбора рецептур зарядов АОС для их практического применения в системах автоматического пожаротушения кроме учета физико-химических, механических, эксплуатационных, огнетушащих показателей, необходимо так же учитывать токсические, электрические, коррозионные свойства огнетушащего аэрозоля и его коэффициент озоноразрушающего действия.

1.2. Анализ современных систем объемного пожаротушения

1.2.1. Особенности построения и функционирования систем объемного пожаротушения

Самыми распространенными системами объемного пожаротушения

до недавнего времени были системы газового тушения. К преимуществам систем газового тушения относятся: возможность быстрого заполнения огнетушащим веществом всего защищаемого объема какой-либо конфигурации, даже при наличии оборудования; быстрота тушения; возможность разбавления горючей среды и предотвращения взрыва. Однако системы газового пожаротушения применяются для защиты объектов, имеющих ограниченную площадь открытых проемов.

По конструкционным особенностям системы пожаротушения, в которых используются газовые огнетушащие составы (ГОС), условно можно разделить на группы:

- централизованные системы, в которых ГОС хранится в резервуарах с единичной вместимостью до 5 тонн;
- батарейные системы из баллонов вместимостью 40–400 литров с единичной вместимостью до 1 тонны;
- автоматические огнетушители для транспортных средств вместимостью до 2–20 литров;
- автоматические модульные системы вместимостью 40 –80 литров.

Несмотря на разнообразие систем газового пожаротушения, все они, имеют схожий принцип построения [95]. На рис. 1.6 приведена упрощенная принципиальная схема централизованной системы газового пожаротушения, на которой цифрами обозначены следующие элементы: 1 – защищаемый объект; 2 – датчик пожарной сигнализации; 3 – распыляющие насадки; 4 – магистральный трубопровод; 5 – электропневмоклапан; 6 – резервуар с огнетушащим веществом; 7 – аккумулятор давления; 8 – манометр; 9 – пульт управления и контроля.

Технологическая часть автоматической системы газового пожаротушения в зависимости от способа хранения ГОС конструктивного исполнения содержит [54]:

- а) централизованная установка:
 - батареи газового пожаротушения, модули и/или изотермические

- резервуары, размещенные в помещении станции пожаротушения;
- коллектор с распределительными устройствами, размещенный в станции пожаротушения;
- магистральный и распределительный трубопроводы;
- насадки;

б) модульная установка:

- модули газового пожаротушения;
- распределительные трубопроводы;
- насадки.

Кроме, того, в состав технологической части системы входит побудительная подсистема.

Алгоритм работы централизованной системы сводится к следующим этапам. Под воздействием факторов пожара срабатывает один или несколько пожарных извещателей, сигнал от которых поступает на пульт управления и контроля. Он формирует команду на открытие электропневмоклапанов 5. Транспортирующий газ из аккумулятора давления 7 попадает в емкость 6, где храниться основной запас огнетушащего вещества. ГОС по магистральному трубопроводу, минуя предварительно открытый клапан 5, поступает в распределительную сеть того объекта, в объеме которого сработал пожарный извещатель. И через выпускные насадки распыляется по защищаемому помещению.

Защиту объекта с применением централизованной системы пожаротушения, как правило, организуют в случае помещения большого объема (до 5000 м³), либо при наличии нескольких защищаемых направлений. В этом случае клапан 5 выполняет функции распределительного устройства.

Для защиты малых объектов или локальных объемов система, представленная на рис. 1.6 может быть упрощена до модульной установки [54], пример которой представлен на рис. 1.7, а технические характеристики в табл. А.1.19.

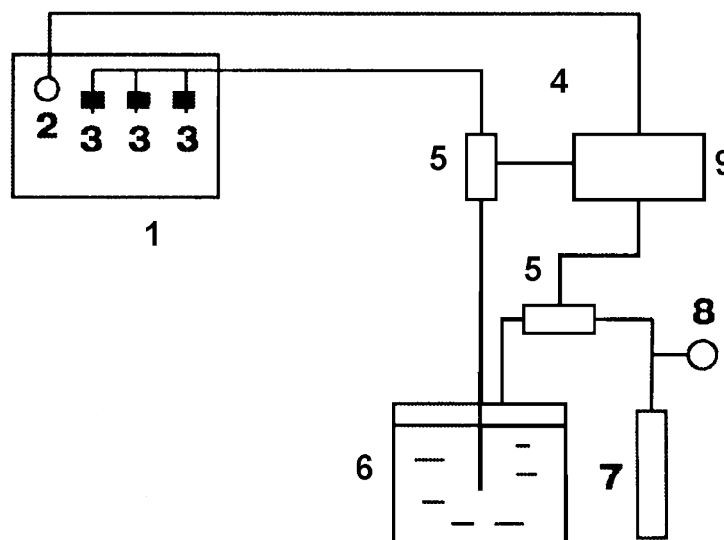


Рис. 1.6. Обобщенная схема системы газового пожаротушения

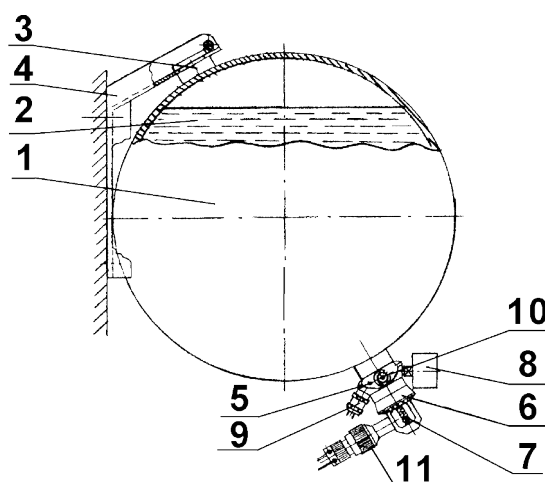


Рис. 1.7. Схема модуля газового пожаротушения "Импульс-20":
 1 – ёмкость для хранения ГОС; 2 – сжиженная ГОС; 3 – крепежная гайка;
 4 – кронштейн; 5 – запорно-распылительное устройство; 6 – распылитель;
 7 – тепловой замок; 8 – манометр; 9 – сигнализатор давления;
 10 – предохранительная мембрана; 11 – электромеханическое пусковое устройство

Величина защищаемого объема варьируется в зависимости от используемых веществ, в качестве которых могут выступать озонобезопасные хладоны.

В любом случае системой газового пожаротушения должны быть решены следующие задачи:

- доставка и выброс огнетушащего вещества в объем защищаемого объекта в течение заданного времени, это обеспечивается высоким избыточным давлением (4,0–12,5 МПа), достаточным запасом транспортирующего газа в аккумуляторе давления и правильным выбором сечения магистральных трубопроводов;
- достижение огнетушащей концентрации в защищаемом объеме за заданное время.

Недостатками систем газового пожаротушения являются [26]:

- опасность воздействия огнетушащих составов или продуктов их разложения на людей, что требует определенных мер предосторожности при их применении;
- необходимость дополнительной подачи ГОС в случае его утечки при наличии открытых проемов в ограждающих конструкциях защищаемых помещений, что усложняет и делает конструкцию установки более дорогой;
- отсутствие заметного охлаждающего эффекта, что при утечке огнетушащего состава может приводить к возникновению повторного воспламенения;
- утечки ГОС при их хранении под высоким давлением;
- высокая металлоемкость системы пожаротушения;
- значительная трудоемкость монтажа и технического обслуживания системы;
- высокая стоимость огнетушащих составов.

Системы порошкового пожаротушения имеют структуру подобную системе газового тушения. Но в виду того, что порошок обладает гораздо

меньшей проникающей способностью, для реализации объемного способа тушения порошковые установки применяются редко. В последние годы стали популярны модульные системы порошкового пожаротушения (рис. 1.8), например, "Пума–12П", "Тайфун-015", "Тайфун-055", "СПРУТ-15". При невысокой стоимости, такие системы могут защищать сравнительно небольшие объемы (табл. А.1.20)

Низкие эксплуатационные характеристик порошков, обуславливают необходимость проведения тщательного технического обслуживания систем порошкового пожаротушения. А невысокие значения защищаемых объемов ограничивают область применения таких систем до локального тушения.

В последние годы все большую популярность приобретает новая реализация объемного способа — аэрозольное пожаротушение [16, 34]. Реализуется этот способ путем создания непосредственно в момент тушения пожара огнетушащего аэрозоля из специального заряда АОС. Устройство, в котором протекает процесс превращения заряда АОС в огнетушащий аэрозоль, называется генератор огнетушащего аэрозоля (ГОА). [61, 62]

Автоматическая система аэрозольного пожаротушения (рис. 1.9) состоит из следующих элементов [33]:

- пожарные извещатели;
- приемно-контрольный прибор пожарной сигнализации;
- приборы и устройства контроля и управления пуском ГОА;
- устройства, обеспечивающие питанием элементы системы;
- шлейфы пожарной сигнализации, электрические цепи питания, управления и контроля системы;
- генераторы огнетушащего аэрозоля;
- устройства, формирующие командные импульсы на отключение систем вентиляции, кондиционирования, воздушного отопления и технологического оборудования;

- устройства, формирующие командные импульсы на закрытие противопожарных клапанов, заслонок вентиляционных коробов;
- устройства оповещения о выпуске огнетушащего вещества;
- устройства сигнализации о закрытии дверей в защищаемом помещении;
- устройства свето-звуковой сигнализации.

Функционирует система аэрозольного пожаротушения следующим образом (рис. 1.9). При поступлении сигнала о пожаре от пожарных извещателей 1, контролирующих различные его признаки, приемно-контрольный прибор 3 формирует и подает сигнал на включение свето-звуковой сигнализации 4 и системы речевого оповещения персонала 5, отключения вентиляции, технологического оборудования 6, закрытие вентиляционных и технологических проемов. Получив от магнитно-контактных датчиков 7 подтверждение о закрытии дверей и других открытых проемов, приемно-контрольный прибор 3 подается командный импульс на устройство управления пуском установки 8, которое в соответствии с заложенным алгоритмом, осуществляет пуск ГОА 9.

Достоинством рассмотренного алгоритма функционирования системы является:

- надежное и достоверное обнаружение очага пожара;
- возможность оперативного контроля целостности цепей сигнализации и питания элементов и узлов системы;
- возможность дистанционного пуска системы;
- возможность вмешательства в процесс работы системы в случае ее несанкционированного срабатывания.

Принцип функционирования автономной системы заключается в следующем. При повышении температуры в защищаемом помещении выше некоторого порогового значения, происходит самовоспламенение и горение специального огнепроводного шнура, который обеспечивает инициирование термохимического узла запуска ГОА. В результате работы, которого происходит активация генератора.

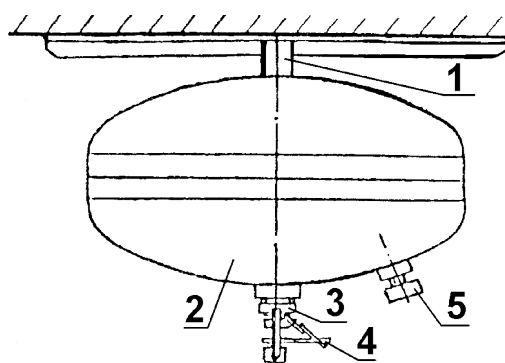


Рис. 1.8. Модуль порошкового пожаротушения "Пума-12 П":
1 – кронштейн; 2 – емкость с огнетушащим порошком; 3 – выпускной насадок; 4 – тепловой замок; 5 – манометр

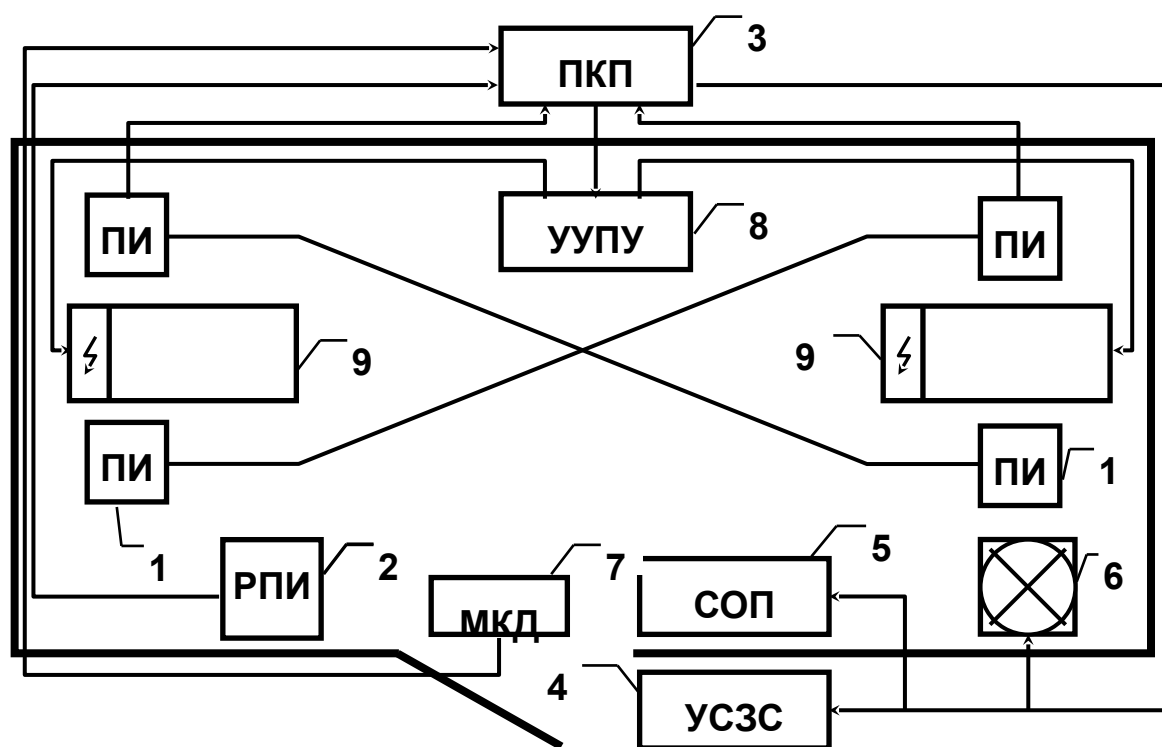


Рис. 1.9. Схема автоматической системы аэрозольного пожаротушения: 1 – автоматический пожарный извещатель; 2 – ручной пожарный извещатель; 3 – приемно-контрольный прибор пожарной сигнализации; 4 – устройства свето-звуковой сигнализации; 5 – система речевого оповещения персонала; 6 – технологическое оборудование; 7 – магнитно-контактный датчик; 8 – устройство управления пуском ГОА; 9 – ГОА с электрическим пуском

Одно из преимуществ такого варианта построения системы состоит в отсутствии внешних источников питания, то есть система работает автономно [99]. Вместе с тем, такой подход к организации защиты объекта исключает возможность контроля и управления процессом пожаротушения, а так же включения системы оповещения о пожаре.

Сравнительный анализ структуры и схем построения традиционных систем объемного пожаротушения и аэрозольных систем показал, что последние обладают следующими достоинствами:

- высокая огнетушащая эффективность;
- отсутствие сосудов под давлением для хранения огнетушащего вещества;
- отсутствие распределительной сети трубопроводов для доставки огнетушащего вещества;
- реализуется экологически безвредный способ пожаротушения;
- широкий диапазон температур эксплуатации;
- длительный срок эксплуатации и простота технического обслуживания.

Так же необходимо отметить, что во всех системах может быть использована одинаковая побудительная подсистема. Потому временные характеристики той или иной системы будут определяться быстродействием её исполнительных элементов. Очевидно, что при прочих равных условиях, подача огнетушащего вещества в защищаемый объем системой аэрозольного тушения, начнется сразу же после запуска ГОА. Следовательно, время работы аэрозольной системы будет определяться в основном временем работы генератора, например, у существующих модификаций величина этого параметра варьируется от нескольких секунд до двух с половиной минут.

Таким образом, задача повышения эффективности работы систем аэрозольного пожаротушения может быть решена путем улучшения характеристик исполнительного элемента этой системы – генератора огнетушащего аэрозоля.

1.2.2. Анализ схемных решений генераторов огнетушащего аэрозоля

Генераторы огнетушащего аэрозоля являются основными исполнительными элементами установок объемного аэрозольного пожаротушения. Анализ технических характеристик и областей применения существующих модификаций ГОА [30, 37, 97] позволил предложить классификацию этих устройств по 14 признакам [28]. (См. приложение Б)

ГОА предназначены для получения эффективных огнетушащих аэрозолей и подачи их с требуемыми расходами в результате сжигания зарядов АОС.

Одновременно ГОА обеспечивает сохранность огнетушащего заряда АОС от внешних воздействий, защиту людей, оборудования от непосредственного воздействия опасных факторов в процессе получения огнетушащего аэрозоля.

Основные конструктивные элементы ГОА (рис. 1.10) это: заряд аэрозолеобразующего состава 2, узел инициирования 3 и несгораемый корпус 2 с выходными отверстиями 4 [76].

Заряд АОС, как правило, имеет форму цилиндра (рис. 1.10 а), либо имеет центральный канал, (рис. 1.10 б и 1.10 в). Выходное отверстие может располагаться в торце генератора (рис. 1.10 а и 1.10 б). Выходное отверстие может быть закрыто мембраной (рис. 1.10 б) или крышкой (рис. 1.10 а).

Авторы изобретения [67] предложили конструкцию генератора (рис. 1.11), включающую камеру сгорания с крышками, пиротехнический заряд и воспламенительный узел, причем задняя крышка выполнена в виде сопла Лавалья. Изготовление задней крышки в виде сопла Лавалья позволяет получить скорость газового потока выше критического. Отношение площади критического сечения сопла к площади свободного прохода камеры сгорания не должно превышать 0,6, что, как

утверждают авторы изобретения, позволяет улучшить условия распространения аэрозоля при сохранении огнетушащей способности взвешенных в газе частиц, т.к. в этом случае исключается потеря активности частиц внутри устройства, вследствие взаимодействия со стенкой и коагуляции.

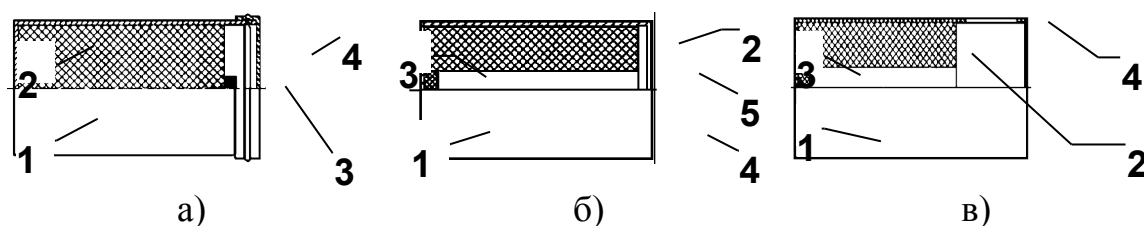


Рис. 1.10. Варианты типовых схемных решений ГОА: 1 – корпус; 2 – аэрозолеобразующий заряд; 3 – узел запуска; 4 – выпускные отверстия; 5 – мембрана

Для повышения эффективности пожаротушения за счет обеспечения создания равномерной концентрации аэрозоля в защищаемом объеме, авторы изобретения [101] предлагают снабдить камеру сгорания механизмом для ее перемещения за счет реактивных сил, возникающих при горении твердотопливного заряда (рис. 1.12). Снижение температуры аэрозоля достигается в этой конструкции в результате применения сопловой насадки в виде диффузора для подсоса воздуха. Такого типа устройства могут быть применены для защиты от пожаров длинных тоннелей и галерей.

Для снижения температуры аэрозоля авторами изобретения [72] предложено несколько технических решений:

- аблирующее покрытие корпуса и сопла;
- воздушно–эжекционная насадка;
- сообщающаяся с корпусом и соплом емкость с охлаждающей жидкостью.

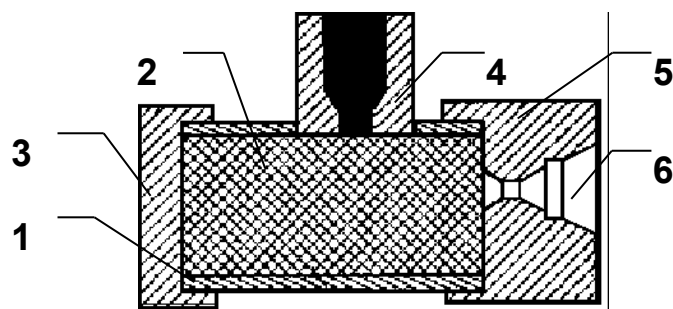


Рис. 1.11. Конструкция генератора с соплом Лаваля: 1 – камера сгорания; 2 – пиротехнический аэрозолеобразующий заряд; 3 – передняя крышка; 4 – воспламенитель; 5 – задняя крышка; 6 – сопло Лаваля

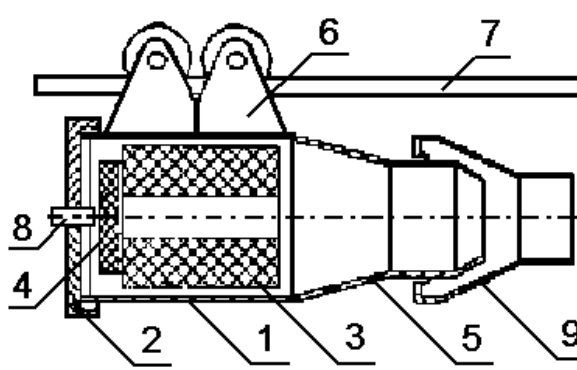


Рис. 1.12. Генератор с механизмом перемещения: 1 – камера сгорания, 2 – крышка; 3 – аэрозолеобразующий состав; 4 – воспламенитель; 5 – сопло; 6 – механизм перемещения; 7 – направляющая; 8 – электрозапал; 9 – диффузор-насадка

Аблирующая облицовка (рис. 1.13), во-первых, предохраняет корпус от чрезмерного разогрева, а во-вторых, снижает температуру рабочей аэрозольной смеси за счет разбавления ее газовыми продуктами термораспада облицовки. Кроме того, наличие в продуктах распада облицовки CO_2 и H_2O улучшает огнетушащие свойства рабочей смеси.

При использовании для дополнительного охлаждения аэрозольной смеси воздушно-эжекционной насадки (рис. 1.14), через отверстия 6 происходит эжекция воздуха потоком аэрозоля. Поскольку объем эжектируемого воздуха целиком определяется скоростью потока аэрозольной смеси, а следовательно давлением в камере сгорания (корпусе генератора), на которое обычно имеется ограничения (2 атм.), возможности чисто эжекционного охлаждения ограничены и его целесообразно сочетать с использованием аблирующих облицовок.

На рис. 1.15 приведена конструкция генератора с жидкостным охлаждением. Для охлаждения аэрозоля использована емкость 7 с жидкостью, сообщающаяся отверстиями 6 и 8 с корпусом и соплом. В отверстии 8 установлена форсунка для распыла жидкости.

Авторами изобретения [81] предложена конструкция генератора с оппозиционным расположением зарядов [12] (рис. 1.16), а также компактная конструкция генератора (рис. 1.17), в которой корпус состоит из наружного и внутреннего полукорпуса в виде "стаканов" [8, 75]. В первом случае предложено схемное решение со скрепленным зарядом в пластиковом корпусе, при этом состав легко воспламеняется и устойчиво горит при атмосферном давлении, в продуктах сгорания содержится минимум недоокисленных компонентов, генератор в процессе работы имеет нулевую тягу.

В генераторе, схема которого представлена на рис. 1.17, аэрозолеобразующий заряд размещен во внутреннем полукорпусе.

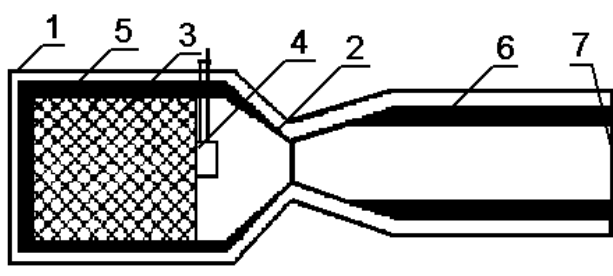


Рис. 1.13. Конструкция генератора с аблирующей облицовкой: 1 – корпус 2 – сопло, 3 – аэрозолеобразующий состав, 4 – воспламенитель. 5, 6 – аблирующая облицовка, 7 – диафрагма

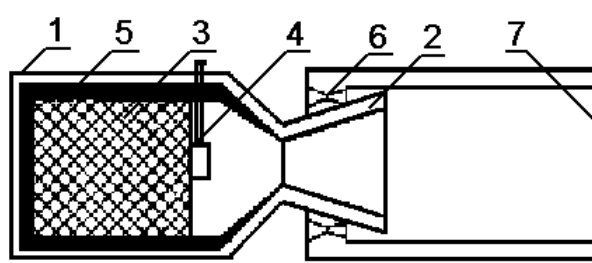


Рис. 1.14. Конструкция генератора с воздушно-эжекционной насадкой: 1 – корпус, 2 – сопло, 3 – аэрозолеобразующий состав, 4 – воспламенитель, 5 – аблирующая облицовка. 6 – эжекционные отверстия, 7 – воздушно-эжекционная насадка

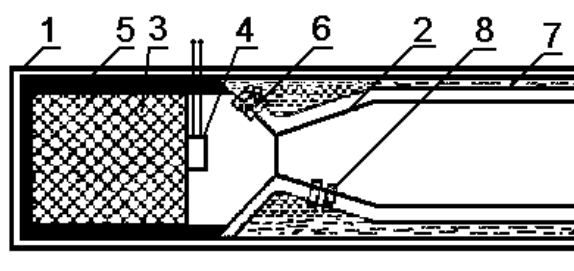


Рис. 1.15. Конструкция генератора с жидкостным охлаждением: 1 – корпус; 2 – сопло; 3 – аэрозолеобразующий состав; 4 – воспламенитель; 5 – аблирующая облицовка; 6, 8 – отверстия; 7 – емкость

Внутренний полукорпус коаксиально установлен во внешнем полукорпусе таким образом, что кольцевой зазор между обечайками полукорпусов образует газопровод для истечения аэрозоля. На внутреннюю поверхность внешнего полукорпуса может наноситься покрытие из материала, разлагающегося при нагревании и охлаждающего аэрозоль. Специалистами ОКБ "Темп" и ИВЦ "Техномаш" на основе состава ПТ-50-2 разработана конструкция генератора [100], который можно применять для защиты помещений с взрывоопасной средой.

Очевидно, что при реализации обеих схем построения ГОА преследовалась цель снижение температуры продуктов сгорания заряда АОС. Первое изобретение реализовано в генераторах марки АПГ-3, АПГ-10 [12], а вторая схема – в генераторах марки "ОСА-М" [42].

Популярны конструкции генераторов, в которых аэрозоль с целью охлаждения пропускается через слой насыпного тепло поглотителя. Так в конструкции, разработанной специалистами ФЦДТ "Союз" [74], и реализованной в генераторах семейства "МАГ", аэрозоль проходит через теплопоглощающую насадку (рис. 1.18). В качестве теплопоглотителя применяются измельченные металл, стекло, керамика, гравий и т.д. или их смесь, а также полимерный материал в виде трубочек, собранных в пучок, в виде моноблока с отверстиями. Для повышения эффективности генератора в нижний слой теплопоглощающей насадки дополнительно вводится активные компоненты в виде гранул, резаных пластинок или шнура из аэрозолеобразующего компонента.

Генератор, схема реализации которого предложена в [83], содержит пиротехническую шашку, которая установлена в корпусе через абляционную термозащитную прослойку (рис. 1.18). Она состоит из гидрокарбоната натрия, который эндотермически разлагается с образованием дополнительных ингибиторов горения. Аэрозольная смесь через равномерно распределенные в крышке корпуса выпускные отверстия поступает в охлаждающий цилиндр, установленный с

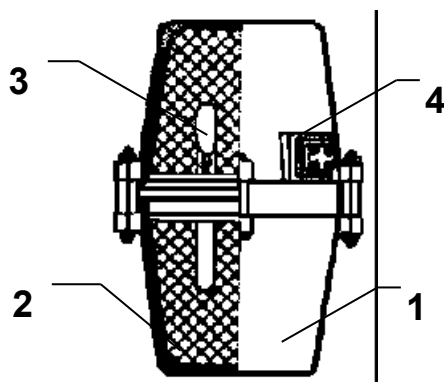


Рис. 1.16. Конструкция генератора с оппозиционным расположением зарядов: 1 – корпус; 2 – аэрозолеобразующий заряд; 3 – узел запуска; 4 – клеммная колодка

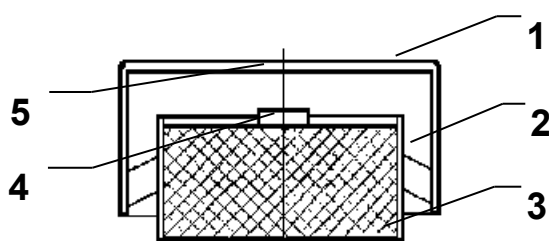


Рис. 1.17. Конструкция генератора с коаксиально расположенными полукорпусами: 1 – внешний полукорпус; 2 – внутренний полукорпус; 3 – аэрозолеобразующий заряд; 4 – воспламенитель; 5 – слой охладителя

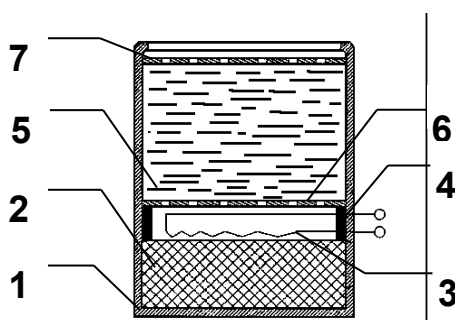


Рис. 1.18. Конструкция генератора с насыпным теплопоглотителем: 1 – корпус; 2 – аэрозолеобразующий заряд; 3 – электрозапал; 4 – опорное кольцо; 5 – теплопоглотительная насадка; 6 и 7 – решетка

возможностью осевого перемещения относительно корпуса, что обеспечивает регулировку величины инжекционного зазора в зависимости от скорости горения шашки.

Предлагаемый генератор [82] содержит коаксиально установленные в корпусе пиротехнический заряд 2 и блок охлаждения (рис. 1.19). На цилиндрической поверхности корпуса 1 распределены выходные отверстия 6. В перфорированной оболочке блока охлаждения 5 помещен слой таблеток или гранул из охлаждающего материала. Корпус имеет термозащитный слой 4. Блок охлаждения размещен относительно пиротехнического заряда с кольцевым зазором, объем которого выполняет дополнительные функции камеры сгорания, а геометрия оптимизированна для полного дожигания пиротехнической композиции заряда в газовой фазе.

Авторами изобретения [80] предлагается устройство, в котором заряд установлен в корпусе с зазором с соотношением площади зазора и площади наружной поверхности заряда от 1:40 до 1:15. Между зарядом и входными отверстиями установлен регенеративный теплообменник, выполненный в виде плоской параболической спирали с сеткой на обоих торцах. При этом в качестве материала спирали и сетки использованы металлы с температурой плавления выше температуры продуктов сгорания заряда.

Авторами [79] предлагается техническое решение, сущность которого заключается в следующем. Образующуюся при сжигании АОС смесь, подают к очагу горения с одновременным ее охлаждением путем пропускания через слой жидкостного или порошкообразного охладителя. В качестве последнего используют огнетушащий порошок, а в качестве жидкостного — многослойную жидкость, содержащую воду или водный раствор минеральной соли и органическую жидкость. Устройство содержит емкость с охладителем и камеру в виде перевернутого стакана с зарядами твердотопливного состава. Стакан погружен в охладитель, слой

которого, охлаждаясь, образует гидрозатвор, обеспечивающий сбрасывание давления в камере при сжигании зарядов.

В генераторе (рис. 1.20), схема которого описана в [68], продукты сгорания пиротехнического состава 4 пропускают через слой каталитически активного вещества 6, который расположен в зоне максимальной температуры температурного профиля процесса сгорания. При этом за счет перемещения температурного профиля состава температура остается постоянной и не доокисленные продукты сгорания пиротехнического состава сгорают полностью. Охлаждение полностью окисленных продуктов сгорания происходит за счет взаимодействия с веществами, обладающими теплопоглощающими свойствами, при этом происходит фильтрация огнетушащего состава по размеру частиц. Устройство содержит корпус 1 с выходным отверстием 2. В корпусе расположена камера для сжигания 3 пиротехнического состава с поджигающим приспособлением 5, теплоизолированная от стенок корпуса. В корпусе установлены блок охлаждения 8 и блок каталитического охлаждения 6, содержащий две расположенные на расстоянии решетки 7. Между решетками размещено каталитически активное вещество, находящееся на постоянном расстоянии от пиротехнического состава. Предусмотрено компенсационное устройство 9, которое фиксирует пиротехнический состав 4 в неподвижном положении.

Предложен аэрозольный генератор для тушения пожара в виде блока из последовательно соединенных между собой однотипных элементов [84]. Элементом блока является цилиндрический корпус с выпускными отверстиями на его боковой поверхности, центральной металлической трубкой с боковыми отверстиями и расположенным вокруг трубки аэрозолеобразующим составом. Соседние элементы блока соединяются между собой с помощью цилиндрических втулок с резьбой и сквозным отверстием, которые завинчиваются в трубки соседних генераторов. Свободные концы сквозной центральной трубки с одной стороны

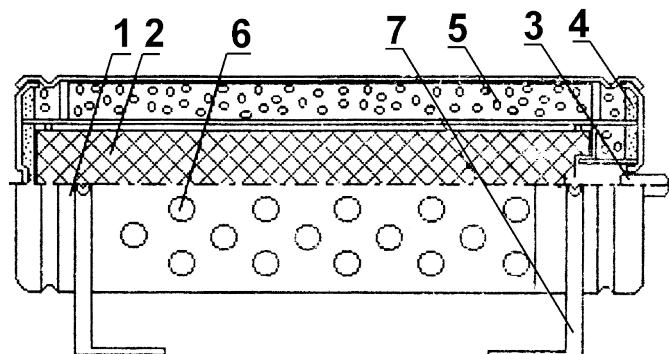


Рис. 1.19. Конструкция генератора с коаксиальным зарядом и блоком охлаждения: 1 – корпус; 2 – заряд АОС; 3 – инициирующее устройство; 4 – термоизолирующий слой; 5 – блок охлаждения; 6 – выпускные отверстия; 7 – кронштейн

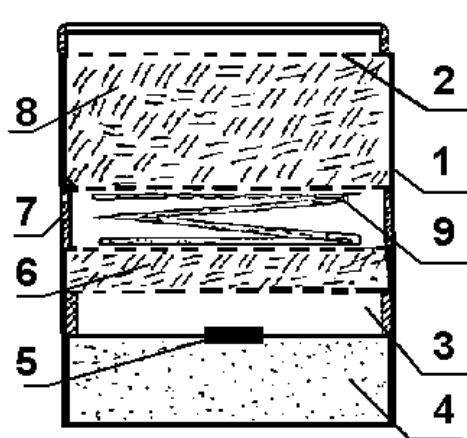


Рис. 1.20. Конструкция генератора с блоком каталитического охлаждения: 1 – корпус; 2 – выпускные отверстия; 3 – камера сгорания; 4 – пиротехнический заряд; 5 – инициирующее устройство; 6 – блок каталитического охлаждения; 7 – решетки; 8 – охлаждающая насадка; 9 – пружина

закрываются узлом запуска с воспламенительным составом, а с другой стороны — металлической заглушкой.

По мнению авторов, данная конструкция позволяет регулировать производительность ГОА, что упрощает контроль и управление в системе автоматического пожаротушения.

Проведенный анализ схемных решений генераторов огнетушащего аэрозоля показал, что на сегодняшний день сформировалась типовая конструкция ГОА. Основную часть генератора составляет заряд АОС, который размещен в термоизолированном корпусе, процесс окисления заряда протекает в камере сгорания, а подача огнетушащего вещества осуществляется через выпускные отверстия. Основная масса предложенных технических решений сводится к решению проблемы высокой температуры огнетушащего аэрозоля. Так же необходимо отметить, что процедура создания новых модификаций ГОА носит экспериментальный характер.

1.3 Постановка задачи исследования и особенности ее решения

Анализ современных систем объемного аэрозольного пожаротушения показал, что имеет место устойчивая тенденция к повышению их эффективности, в частности, путем улучшения временных и расходных характеристик исполнительных элементов таких систем — генераторов огнетушащего аэрозоля. Проведенные исследования показали, что при решении данной задачи, в основном применяется экспериментальный метод совершенствования характеристик, который сопровождается значительными затратами материальных и временных ресурсов, и не дает возможности заранее спрогнозировать значения технических характеристик новых модификаций ГОА.

В данной работе предлагается разработать методические рекомендации, которые позволят проектировать ГОА с

усовершенствованными характеристиками.

Таким образом, основной задачей исследования является — обоснование возможности создания генераторов огнетушащего аэрозоля с улучшенными динамическими характеристиками.

Для достижения цели исследования необходимо:

- провести анализ процессов, протекающих в камере сгорания ГОА;
- построить математические модели, адекватно описывающие процессы, протекающие в камере сгорания ГОА;
- определить параметры заряда АОС, параметры корпуса генератора, обеспечивающие наименьшее время работы ГОА при заданном массовом расходе огнетушащего вещества;
- создать экспериментальную установку для исследования динамических характеристик ГОА;
- разработать методику экспериментального определения характеристик ГОА;
- оценить адекватность полученных математических моделей.

Особенностью решения указанной задачи является то, что процессы, протекающие в камере сгорания генератора, описываются с помощью системы дифференциальных уравнений. Она содержит уравнение сохранения энергии, сохранения массы продуктов сгорания и уравнение состояния идеального газа, и ее решение рассматривается в нульмерном приближении. Определение динамических характеристик камеры сгорания ГОА проводится с привлечением процедуры линеаризации уравнений, связывающих осредненные по свободному объему камеры значения давления, температуры и скорости горения заряда АОС. Для определения параметров, оказывающих наибольшее влияние на величину времени работы, продолжительности переходного процесса в камере ГОА и величину массового расхода, предложена процедура имитационного моделирования. Для проверки адекватности математических моделей

проводятся исследования технических характеристик ГОА в ходе эксперимента.

1.4. Выводы

1.4.1. Показано, что среди современных огнетушащих веществ, используемых при объемном тушении пожаров класса В и подкласса А2, самыми эффективными являются огнетушащие аэрозоли.

1.4.2. Исследование рецептур современных зарядов АОС и свойств получаемых из них огнетушащих аэрозолей, показало, что современные аэрозолеобразующие составы имеют высокие эксплуатационные характеристики: огнетушащая концентрация в 3–5 раз ниже огнетушащей концентрации хладона 13В1, при этом коэффициент озоноразрушающего действия аэрозоля равен нулю, при огнетушащих концентрациях продукты сгорания АОС безопасны для людей, не оказывают разрушающего действия на защищаемое оборудование. Однако температура продуктов сгорания принимает относительно высокие значения.

1.4.3. Анализ особенностей построения современных систем объемного тушения показал, что системы аэрозольного пожаротушения имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными системами, а именно: отсутствие емкостей под давлением для хранения и трубопроводов для доставки огнетушащего вещества; низкая металлоемкость системы; простота технического обслуживания и длительный срок её эксплуатации.

Так же показано, что временные характеристики системы аэрозольного пожаротушения в основном определяются техническими характеристиками ГОА и совершенствование этих характеристик приведет к повышению эффективности работы всей системы.

1.4.4. Анализ особенностей схемных решений существующих ГОА и тенденций относительно усовершенствования их характеристик показал, что основными направлениями повышения их эффективности является снижение температуры продуктов сгорания заряда АОС, исключение возможности попадания недоокисленных компонентов в защищаемый объем, а также усовершенствование таких технических характеристик ГОА, как – время работы, быстродействие, массовый расход огнетушащего аэрозоля.

1.4.5. Сформулирован перечень подзадач, решение которых обеспечит доказательство цели исследования.

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГЕНЕРАТОРА ОГНЕТУШАЩЕГО АЭРОЗОЛЯ

2.1. Обобщенная схема генератора огнетушащего аэрозоля. Основные допущения при моделировании рабочих процессов в камере генератора

Анализ различных вариантов конструкции ГОА, характеристик и типов зарядов АОС позволил сформировать обобщенную конструкцию генератора и описать физическую модель процессов протекающих в камере сгорания генератора [35].

Описываемый ГОА (рис. 2.1) состоит из корпуса 1, который имеет форму полого правильного цилиндра. Внутри корпуса расположен заряд АОС 2 цилиндрической формы, боковая поверхность шашки заряда плотно прилегает к термоизолирующему покрытию корпуса 3, таким образом, горение осуществляется с торца, поверхность горения заряда имеет форму круга. К передней части корпуса прикреплена крышка 4, в которой выполнены выпускные отверстия 5. Изначально выпускные отверстия закрыты материалом, который легко разрушается во время работы генератора. Также в крышке закреплено инициирующее устройство 6, приводимое в действие импульсом тока. Заряд АОС представляет собой механическую смесь двух основных компонентов: окислителя и веществ, которые играют роль горючего связующего. Свободный объем камеры сгорания ГОА образован пересечением боковой поверхности корпуса со следующими поверхностями: в передней части – крышкой корпуса, в задней – поверхностью заряда, по которой осуществляется процесс горения.

Начало горения инициируется от внешнего воздействия на заряд АОС, создаваемого узлом запуска, при этом происходит выброс горючих газов,

имеющих высокую температуру в свободный объем камеры сгорания. В результате нагрева поверхности заряда АОС продукты его разложения, испарившись с поверхности, поступают в окружающую газовую среду. Горючий компонент имеет более высокую скорость разложения, чем кристаллы окислителя, поэтому он быстрее переходит в газообразное состояние. Образующиеся у поверхности пары топлива, богатые горючим компонентом, вступают в реакцию между собой, а также с кислородом, содержащимся в окружающей среде. Когда количество тепла, генерируемого химическим путем, становится равным потерям тепла в результате теплопроводности в окружающую среду, происходит воспламенение заряда АОС. Как показал анализ [107] длительность рассмотренного периода составляет $0.1 \div 15$ мс, что значительно меньше времени основного режима работы, поэтому будем считать, что процесс инициирования происходит практически мгновенно, а воспламенение заряда происходит сразу по всей поверхности горения. При превышении порогового значения избыточного давления в свободном объеме камеры сгорания генератора происходит разрушение заглушек в выпускных отверстиях и начинается выход продуктов сгорания заряда АОС вместе с продуктами сгорания воспламеняющего состава во внешнюю среду. Продукты сгорания будем считать идеальным газом.

После воспламенения всей поверхности процесс горения протекает по следующей схеме (рис. 2.2) в зоне I происходит прогрев заряда за счет тепла поступающего из газовой фазы IV. В зоне II протекает реакция в конденсированной фазе, которая является суммарно слабо экзотермической. В зоне III происходит смешивание непрореагировавших компонентов, а в зоне IV заканчивается процесс горения состава и в зоне V происходит конденсация продуктов сгорания с образованием аэрозоля, который представляет собой смесь твердых частиц и газов.

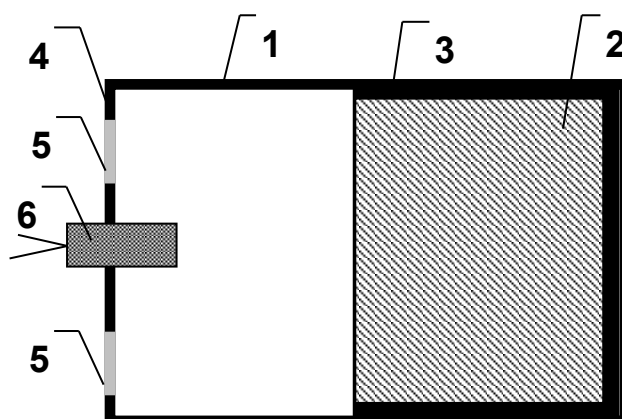


Рис. 2.1. Принципиальная схема генератора огнетушащего аэрозоля:
1 – корпус; 2 – заряд АОС; 3 – теплоизолирующий слой; 4 – крышка;
5 – выпускные отверстия; 6 – инициирующее устройство

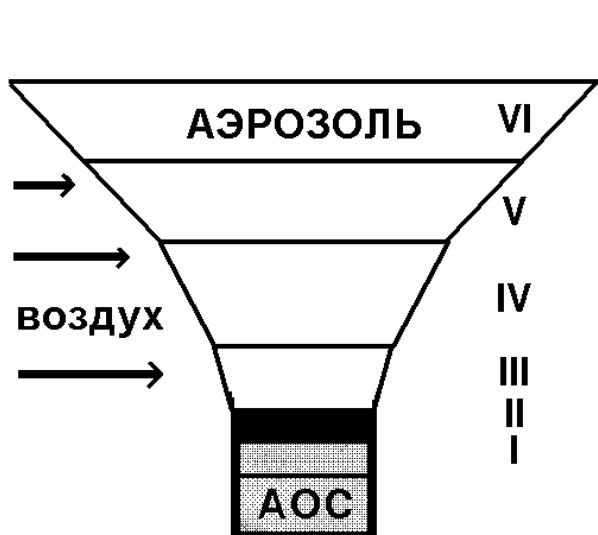


Рис. 2.2. Схема процесса аэрозолеобразования при сгорании заряда
АОС

Таким образом, после воспламенения всей поверхности заряда, нет необходимости в дальнейшем его нагревании, так как выделяющееся количество теплоты в газовой фазе достаточно для прогрева и дальнейшего воспламенения соседних слоев и протекания самоподдерживающихся реакций горения. Равномерное горение обеспечивается за счет равенства теплоприхода и теплоотвода во всех зонах реакции. Принимаем, что скорость выгорания заряда равномерна во всем его объеме, то есть горение заряда происходит эквидистантными слоями. Так же считаем, что все газодинамические параметры зависят от одной единственной геометрической координаты и от времени, таким образом, течение аэрозоля в элементах ГОА является преимущественно одномерным.

В течение основного периода работы генератора происходит изменение всех газодинамических характеристик, но неоднородности давления, обусловленные неустановившимися течениями аэрозоля, пренебрежимо малы, потому будем считать, что движение аэрозоля в генераторе является квазистационарным. Последовательное применение идей квазистационарности дает возможность рассматривать более быстрые процессы как мгновенные. Потому процесс релаксации теплового слоя заряда АОС, определяющий согласно [47] изменение скорости горения при изменении внешних условий, в квазистационарном приближении считается мгновенным по сравнению с процессом релаксации свободного объема. Время тепловой релаксации аэрозоля на несколько порядков меньше времени релаксации свободного объема и потому считается пренебрежимо малым.

Окончанием работы генератора будем считать момент полного выгорания заряда АОС. Он будет сопровождаться быстрым изменением давления в камере сгорания ГОА и температуры продуктов сгорания. Что значительно меньше всего времени работы генератора.

Таким образом, при рассмотрении рабочих процессов в камере сгорания генератора можно выделить три характерных периода:

- выход генератора на рабочий режим, этот период включает время воспламенения инициирующего устройства, время воспламенения заряда и время заполнения свободного объема камеры ГОА, это время отсчитывается от момента подачи импульса тока на инициирующее устройство;
- основной период работы генератора, который характеризуется горением заряда, на этот интервал приходится основная часть всего времени работы;
- время спада давления, наступающее после сгорания основной части заряда АОС.

Причем первый и третий периоды значительно менее продолжительные по сравнению со вторым и потому при моделировании рабочих процессов в камере сгорания ГОА этими периодами можно пренебречь или считать их мгновенными. При работе генератора поток аэрозоля в камере одномерный, рабочие процессы квазистационарные.

2.2. Упрощенная математическая модель рабочих процессов в камере сгорания ГОА

2.2.1. Общие замечания к методу осреднения по свободному объему камеры генератора

При строгом подходе расчет изменения параметров газо-аэрозольной смеси внутри камеры во времени неотделим от расчета их изменения по свободному объему камеры и должен осуществляться путем интегрирования общей системы уравнений нестационарного движения

продуктов сгорания в камере при определенных начальных и граничных условиях. Такой подход в принципе позволяет определить давление, плотность и температуру продуктов, заполняющих камеру, как функции координат и времени, однако его реализация сопряжена с рядом трудностей, как в области физической постановки, так и математических методов решения уравнений.

Поэтому будем использовать прием, упрощающий постановку и решение задачи, сущность которого состоит в осреднении физических величин, характеризующих процесс внутри камеры генератора, по всему свободному объему.

Метод осреднения по свободному объему составляет основу так называемой нульмерной баллистики [88], предмет которой состоит в установлении зависимости средних по объему величин давления, плотности и температуры от времени. Уравнения, описывающие изменение во времени среднеобъемных значений физических величин, можно трактовать как решение задачи о течении газа в камере сгорания в «нулевом» приближении, т. е. решение, построенное без учета переменнойности давления, плотности и температуры по длине камеры.

Для расчета средних по свободному объему величин: давления, плотности и температуры продуктов сгорания заряда АОС, необходимо применить законы сохранения массы и энергии ко всей совокупности этих продуктов, содержащихся в свободном объеме камеры генератора. В этом случае значения давления, температуры и плотности продуктов сгорания в различных точках свободного объема считаются одинаковыми и потому в определенной мере отвлеченными величинами, удовлетворяющими законам сохранения.

2.2.2. Уравнения сохранения энергии, массы продуктов сгорания и уравнение состояния идеального газа для осредненных по свободному объему камеры генератора параметров газо-аэрозольной смеси

В основу математической модели процессов в камере сгорания генератора положим уравнения сохранения массы и энергии [2].

$$\frac{\partial(\rho \cdot F)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot \omega \cdot F) = \rho_T \cdot \Pi \cdot u; \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\rho \cdot F \cdot \left(e + \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \cdot \omega \cdot F \left(h + \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \right) \right) = \rho_T \cdot \Pi \cdot u \cdot \chi \cdot h_T, \quad (2.2)$$

где ρ , ρ_T – плотность продуктов сгорания и заряда; ω – скорость продуктов сгорания; Π , F – смоченный периметр и площадь поперечного сечения; e , h – внутренняя энергия и энтальпия единицы массы продуктов сгорания; χ – средний по времени и объёму коэффициент тепловых потерь в генераторе; h_T – полная энтальпия продуктов сгорания аэрозолеобразующего заряда; u – средняя по периметру скорость горения заряда.

К этим уравнениям добавим уравнение горячей поверхности и уравнение состояния идеального газа, которые представим в виде:

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} = \Pi u, \quad (2.3)$$

$$p = \rho R T, \quad (2.4)$$

где T – температура продуктов сгорания; R – газовая постоянная.

Применяем к этим уравнениям метод осреднения параметров по свободному объему камеры генератора. Для этого проинтегрируем уравнения (2.1) и (2.2) по длине заряда. В результате уравнения сохранения массы запишется в виде

$$\frac{d}{dt}(\bar{\rho} \cdot V_K) = p_T \cdot S_3 \cdot \bar{u} - m_*(\bar{p}_B, \bar{T}_B), \quad (2.5)$$

где $\bar{\rho}$ – средняя по объему камеры плотность продуктов сгорания; V_K – свободный объем камеры сгорания; S_3 – площадь поверхности горения; $m_*(\bar{p}_B, \bar{T}_B)$ – массовый секундный расход продуктов сгорания через выходные отверстия корпуса генератора.

Уравнение сохранения энергии для средних по свободному объему параметров продуктов сгорания после интегрирования будет выглядеть следующим образом

$$\frac{d}{dt}(\bar{E} \cdot \bar{\rho} \cdot V_K) = p_T \cdot S_3 \cdot \bar{u} \cdot \chi \cdot \bar{H}_T - m_*(\bar{p}_B, \bar{T}_B) \cdot c_p \cdot \bar{T}_B, \quad (2.6)$$

где $\bar{T}_B$ – средняя температура в передней части камеры генератора;
 $\bar{E}$ – внутренняя энергия единицы массы продуктов сгорания;
 $\bar{H}_T$ – теплосодержание единицы массы продуктов сгорания.

Уравнение, характеризующее изменение свободного объема V_K камеры генератора во времени

$$\frac{dV_K}{dt} = S_3 \cdot \bar{u}, \quad (2.7)$$

где $\bar{u}$ – средняя по поверхности скорость горения, которая определяется из следующей зависимости [25, 27, 64]:

$$\bar{u} = u_a \cdot \left(\frac{\bar{p}_s}{p_{ATM}} \right)^v \cdot e^{\beta \cdot T_H}, \quad (2.8)$$

где u_a – скорость горения заряда АОС при атмосферном давлении; $\bar{P}_s$ – среднее по горячей поверхности давление; P_{ATM} – атмосферное давление; T_H – начальная температура заряда АОС; β – постоянная, зависящая от начальной температуры заряда.

Интегрирование по свободному объему V_K уравнения состояния идеального газа даст зависимость

$$\bar{P}_v = R \cdot \bar{\rho} \cdot \bar{T}, \quad (2.9)$$

где $\bar{P}_v$ – среднее по объему давление; $\bar{T}$ – средняя температура продуктов в камере.

Уравнения (2.4)–(2.9) образуют систему, описывающую изменение во времени средних по объему физических параметров продуктов сгорания заряда АОС. Но данная система незамкнута, так как число неизвестных в ней больше числа уравнений. С учетом того, что относительные перепады давления и температуры продуктов сгорания АОС, заполняющих свободный объем, невелики, можно сделать ряд упрощений, позволяющих замкнуть указанную систему.

2.2.3. Система уравнений, описывающих изменение средних по объему физических параметров продуктов сгорания аэрозолеобразующего заряда

Отождествим среднее по объему давление $\bar{P}_v$, среднее по горячей поверхности давление $\bar{P}_s$ и давление торможения в передней части камеры генератора $\bar{P}_B$

$$\bar{P} = \bar{P}_v = \bar{P}_s = \bar{P}_B. \quad (2.10)$$

Также, пусть средняя температура продуктов в камере $\bar{T}$ тождественна со средней температурой в передней части камеры $\bar{T}_в$

$$\bar{T} = \bar{T}_в. \quad (2.11)$$

Если считать продукты сгорания в камере генератора идеальным газом, то выражение для внутренней энергии и теплосодержания единицы массы продуктов сгорания можно записать:

$$\bar{E} = c_v \cdot \bar{T}, \quad \bar{H}_г = c_p \cdot \bar{T}_г. \quad (2.12)$$

С учетом выражений (2.10)-(2.11) уравнения (2.4)-(2.9) перепишем в виде системы:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} (\bar{p} \cdot V_K) = p_T \cdot S_3 \cdot \bar{u} - m_* (\bar{p}, \bar{T}); \\ \frac{d}{dt} (c_v \cdot \bar{p} \cdot T \cdot V_K) = p_T \cdot S_3 \cdot \bar{u} \cdot c_p - \bar{E} \cdot m_*; \\ \frac{dV_K}{dt} = S_3 \cdot \bar{u}; \\ \bar{u} = u(\bar{p}, \bar{T}); \quad p = R \cdot \bar{p} \cdot T. \end{cases} \quad (2.13)$$

Перепишем первое уравнение системы (2.13) с учетом третьего уравнения, в виде:

$$V_K \cdot \frac{d\bar{p}}{dt} = p_T \cdot S_3 \cdot \bar{u} - \bar{p} \cdot S_3 \cdot \bar{u} - m_* (\bar{p}, \bar{T}), \quad (2.14)$$

учитывая, что масса газа, заполняющего объем ΔV_K мала по сравнению с массой всего образовавшегося в результате горения газа, то слагаемым $\bar{p} \cdot S_3 \cdot \bar{u}$ можно пренебречь.

Второе уравнение системы (2.13) после преобразования представим следующим образом:

$$V_K \cdot \frac{d}{dt} (c_v \bar{p} \cdot \bar{T}) = \rho_T S_3 \bar{u} \chi \cdot c_p \cdot \bar{T}_T - c_v \bar{p} \cdot \bar{T} S_3 \bar{u} - m_*(\bar{p}, \bar{T}) c_p \cdot \bar{T}. \quad (2.15)$$

Если пренебречь внутренней энергией $c_v \bar{p} \cdot \bar{T} S_3 \bar{u}$ газов, заполняющих освободившийся в процессе горения заряда АОС объем ΔV_K , по сравнению с теплосодержанием газов образующихся при горении и при условии, что $c_v = \text{const}$, система (2.13) примет вид:

$$\begin{cases} V_K \cdot \frac{d\bar{p}}{dt} = \rho_T S_3 \bar{u} - m_*(\bar{p}, \bar{T}); \\ V_K \cdot \frac{d}{dt} (\bar{p} \cdot \bar{T}) = \rho_T S_3 \bar{u} \chi \cdot \bar{T}_T - m_*(\bar{p}, \bar{T}) c_p \cdot \bar{T}; \\ \frac{dV_K}{dt} = S_3 \bar{u}; \\ \bar{u} = u(\bar{p}, \bar{T}); \quad \bar{p} = R \cdot \bar{\rho} \cdot \bar{T}, \end{cases} \quad (2.16)$$

где k – показатель адиабаты, который определяется из выражения:

$$k = \frac{c_p}{c_v}. \quad (2.17)$$

Массовый секундный расход при докритическом истечении определяется выражением [2]:

$$m_*(\bar{p}, \bar{T}) = \mu \cdot S_B \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{\bar{p}^2}{R \cdot \bar{T}} \cdot \left(\frac{P_{ATM}}{\bar{p}} \right)^{\frac{2}{k}} \left(1 - \left(\frac{P_{ATM}}{\bar{p}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}, \quad (2.18)$$

где S_B – площадь выходных отверстий генератора; μ – коэффициент расхода через выходные отверстия.

С учетом уравнения состояния идеального газа и выражения для скорости горения (2.8), преобразуем систему (2.7) к виду:

$$\begin{cases} V_K \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{R \cdot \bar{T}}{\bar{p}} \cdot [\rho_T S_3 \bar{u} \cdot (\chi \cdot k \cdot \bar{T}_T - \bar{T}) + \bar{T}]; \\ V_K \cdot \frac{d\bar{p}}{dt} = R \cdot k \cdot [\rho_T S_3 \bar{u} \chi \cdot \bar{T}_T - m_*(\bar{p}, \bar{T})]; \\ \frac{dV_K}{dt} = S_3 \cdot \bar{u}. \end{cases}$$

Таким образом, получена система нелинейных дифференциальных уравнений, определяющая зависимость газодинамических параметров камеры сгорания ГОА, осредненных по ее свободному объему.

2.3. Система линеаризованных уравнений камеры сгорания генератора огнетушащего аэрозоля

В общем случае система уравнений (2.19) или эквивалентная ей система (2.16), характеризующая изменение во времени среднеобъемных значений давления, плотности и температуры продуктов сгорания аэрозольобразующего заряда может быть решена лишь численными методами. В тоже время, введение упрощающих предположений позволяет получить приближенные аналитические решения уравнений внутренней баллистики для переходных процессов изменения давления. В основу рассмотренного ниже метода линеаризации положены следующие допущения [24]:

- свободный объем V_K камеры генератора неизменен в течение рассматриваемого переходного процесса;
- среднеобъемная температура $\bar{T}$ газо-аэрозольной смеси и ее термодинамические характеристики мало изменяются во времени.

При линеаризации допускаем, что в динамическом режиме работы генератора отклонения давления и температуры от значений, соответствующих установившемуся режиму работы ГОА, малы. Поэтому можно записать:

$$\bar{p}(t) = p_{ct} + \delta p(t); \quad (2.20)$$

$$\bar{T}(t) = T_{ct} + \delta T(t); \quad (2.21)$$

$$T_H(t) = T_{H_{ст}} + \delta T_H(t), \quad (2.22)$$

где $p_{ст}$ – среднеобъемное давление в установившемся режиме; $\delta p(t)$ – отклонение среднеобъемного давления газо-аэрозольной смеси от значения, соответствующего стационарному; $T_{ст}$ – среднеобъемная температура в установившемся режиме; $\delta T(t)$ – отклонение среднеобъемной температуры от значения, соответствующего стационарному; $\delta T_H(t)$ – отклонение начальной температуры.

Дифференцируя, справа и слева выражения (2.20) – (2.21) имеем:

$$\frac{d \bar{p}}{d t} = \frac{d \delta p}{d t}, \quad (2.23)$$

$$\frac{d \bar{T}}{d t} = \frac{d \delta T}{d t}. \quad (2.24)$$

В отклонениях первое уравнение системы (2.19) будет выглядеть следующим образом:

$$V_K \cdot \frac{d \delta T}{d t} = \frac{R \cdot T_{ст}}{p_{ст}} \cdot [\alpha_{11} \cdot \delta T + \alpha_{12} \cdot \delta p + \beta_1 \cdot \delta T_H], \quad (2.25)$$

где

$$\alpha_{11} = (-1) \cdot \rho_T \cdot S_3 \cdot u_{ст} + (1 - k) \cdot m_{ст}^* - \frac{1}{2} \cdot (1 - k) \cdot m_{ст}^*; \quad (2.26)$$

$$\alpha_{12} = \frac{\rho_T \cdot S_3 \cdot u_{ст} \cdot v \cdot (\chi \cdot \bar{T}_T \cdot k - T_{ст})}{p_{ст}} + \frac{T_{ст} \cdot (1 - k) \cdot m_{ст}^* \cdot \varphi_p}{2 \cdot k \cdot p_{ст}}; \quad (2.27)$$

$$\beta_1 = \rho_T \cdot S_3 \cdot u_{ст} \cdot \beta \cdot (\chi \cdot \bar{T}_T \cdot k - T_{ст}); \quad (2.28)$$

$$\varphi_p = \frac{(k - 1) \cdot (2 \cdot p_{ст}^\alpha - p_a^\alpha)}{p_{ст}^\alpha - p_a^\alpha}, \quad (2.29)$$

$m_{ст}^*$ – расход в установившемся режиме работы; $u_{ст}$ – скорость горения заряда в установившемся режиме работы ГОА.

Введем относительные отклонения:

$$\delta \bar{p} = \frac{\delta p}{p_{\text{ст}}}; \quad (2.30)$$

$$\delta \bar{T} = \frac{\delta T}{T_{\text{ст}}}; \quad (2.31)$$

$$\delta \bar{T}_H = \frac{\delta T_H}{T_{H_{\text{ст}}}}. \quad (2.32)$$

С учетом зависимостей для стационарного режима работы имеем:

$$\tau_1 \cdot \frac{d \delta \bar{T}}{dt} + \delta \bar{T} = K_p \cdot \delta \bar{p} + k_{\text{IT}} \cdot \delta \bar{T}_H, \quad (2.33)$$

где

$$\tau_1 = \frac{2 \cdot V_K \cdot p_{\text{ст}}}{T_{\text{ст}} \cdot R \cdot m_{\text{ст}}^* \cdot (1+k)}; \quad (2.34)$$

$$K_p = \frac{(2 \cdot v \cdot k - \varphi_p) \cdot (k-1)}{k \cdot (k+1)}; \quad (2.35)$$

$$k_{\text{IT}} = 2 \cdot \beta \cdot T_H \cdot \frac{k-1}{k+1}. \quad (2.36)$$

Второе уравнение системы (2.19) в относительных отклонениях будет иметь вид:

$$\frac{V_K}{R} \cdot \frac{d \delta p}{dt} = \alpha_{21} \cdot \delta T + \alpha_{22} \cdot \delta p + \beta_2 \cdot \delta T_H, \quad (2.37)$$

где

$$\alpha_{21} = (-1) \cdot \frac{k}{2} \cdot m_{\text{ст}}^*; \quad (2.38)$$

$$\alpha_{22} = \frac{1}{p_{\text{ст}}} \cdot \left(\rho_T \cdot S_3 \cdot u_{\text{ст}} \cdot \chi \cdot T_{\Gamma} \cdot k - m_{\text{ст}}^* \cdot k \cdot T_{\text{ст}} \cdot \frac{\varphi_p}{2 \cdot k} \right); \quad (2.39)$$

$$\beta_2 = \rho_T \cdot S_3 \cdot u_{\text{ст}} \cdot \chi \cdot T_{\Gamma} \cdot k \cdot \beta. \quad (2.40)$$

С учетом зависимостей для установившегося режима работы уравнение (2.37) будет иметь вид:

$$\tau_2 \cdot \frac{d\delta\bar{p}}{dt} + \delta\bar{p} = K_T \cdot \delta\bar{T} + k_{2T} \cdot \delta\bar{T}_H, \quad (2.41)$$

где

$$\tau_2 = \frac{2 \cdot V_K \cdot p_{ct}}{T_{ct} \cdot R \cdot m_{ct}^* \cdot (\varphi_p - 2 \cdot k \cdot v)}; \quad (2.42)$$

$$K_T = \frac{k}{2 \cdot k \cdot v - \varphi_p}; \quad (2.43)$$

$$k_{2T} = \frac{2 \cdot \beta \cdot T_H \cdot k}{\varphi_p - 2 \cdot k \cdot v}. \quad (2.44)$$

Перепишем уравнения (2.33) и (2.41) в следующем виде:

$$\begin{cases} \tau_1 \cdot \frac{d\delta\bar{T}}{dt} = K_p \cdot \delta\bar{p} - \delta\bar{T} + k_{1T} \cdot \delta\bar{T}_H; \\ \tau_2 \cdot \frac{d\delta\bar{p}}{dt} = K_T \cdot \delta\bar{T} - \delta\bar{p} + k_{2T} \cdot \delta\bar{T}_H. \end{cases} \quad (2.45)$$

Таким образом, система линейных дифференциальных уравнений (2.45) описывает динамические свойства камеры сгорания ГОА.

2.4. Среднеобъемное давление и температура газо-аэрозольной смеси в камере ГОА в установившемся режиме работы

Из анализа системы (2.19) следует возможность существования режима работы генератора, в условиях которого осредненные по свободному объему физические характеристики продуктов сгорания в камере: давление, плотность и температура, изменяются незначительно в окрестности некоторого установившегося значения. Такой режим принято называть квазистационарным. Но в дальнейшем, для простоты будем называть его просто стационарным.

Приравнивая производные первого и второго уравнения системы (2.16) нулю, найдем стационарные значения газодинамических параметров.

Из первого уравнения системы (2.16) следует, что на стационарном режиме приход массы продуктов при сгорании аэрозолеобразующего заряда равен расходу этих продуктов через выходные отверстия, то есть

$$m_*(p_{ct}, T_{ct}) = \rho_T \cdot S_3 \cdot \bar{u}(p_{ct}, T_H) . \quad (2.46)$$

Из второго уравнения системы (2.16) запишем равенство

$$\rho_T \cdot S_3 \cdot \bar{u}(p_{ct}, T_H) \cdot \chi \cdot k \cdot \bar{T}_\Gamma - m_*(p_{ct}, T_{ct}) \cdot k \cdot \bar{T}_{ct} = 0 . \quad (2.47)$$

Подставляя сюда (2.46) получим выражение для определения стационарной температуры:

$$T_{ct} = \bar{T}_\Gamma \cdot \chi . \quad (2.48)$$

Далее, подставим в (2.46) выражение для скорости горения (2.8), массового расхода (2.18) и зависимость (2.48):

$$\rho_T \cdot S_3 \cdot u_a \cdot \left(\frac{p_{ct}}{p_{atm}} \right)^v e^{\beta \cdot T_H} = u \cdot S_b \cdot \sqrt{\frac{2}{\alpha} \cdot \frac{p_{ct}^2}{R \cdot T_{ct}} \cdot \left(\frac{p_{atm}}{p_{ct}} \right)^{\frac{2}{k}} \left(1 - \left(\frac{p_{atm}}{p_{ct}} \right)^\alpha \right)} , \quad (2.49)$$

где $\alpha = \frac{k-1}{k}$.

Разрешим равенство (2.49) относительно p_{ct} .

Получим уравнение вида:

$$\eta \cdot p_*^{2v} - p_*^{2\alpha} + p_*^\alpha = 0 , \quad (2.50)$$

где $p_* = \frac{p_{CT}}{p_{ATM}}$,

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\rho_T \cdot S_3 \cdot u_l}{\mu \cdot S_B \cdot p_{ATM}} \right)^2 \cdot T_\Gamma \cdot \chi \cdot R \cdot \alpha. \quad (2.51)$$

Аналитическое решение иррационального уравнения (2.50) возможно в следующих частных случаях.

Случай 1. Когда $\nu = \frac{\alpha}{2}$, уравнение (2.50) преобразуется к виду

$$(\eta + 1) \cdot p_*^\alpha - p_*^{2\alpha} = 0. \quad (2.52)$$

Вводя замену

$$z = p_*^\alpha, \quad (2.53)$$

легко привести уравнение (2.52) к квадратному, решением которого будет один действительный, отличный от нуля корень

$$z = 1 + \eta. \quad (2.54)$$

Таким образом, значение стационарного давления для этого частного случая будет определяться следующим выражением:

$$p_{CT} = p_{ATM} \cdot \sqrt[\alpha]{1 + \eta}. \quad (2.55)$$

Случай 2. При условии, что $\nu = \alpha$, уравнение (2.50) преобразуется в следующий вид:

$$(\eta - 1) \cdot p_*^{2\alpha} + p_*^\alpha = 0 \quad (2.56)$$

после введения замены (2.53) получим в качестве решения положительный корень

$$z = \frac{1}{1 - \eta}. \quad (2.57)$$

Тогда стационарное давление определяется выражением

$$p_{CT} = p_{ATM} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - \eta}}. \quad (2.58)$$

Случай 3. Если $\nu = \frac{3}{2} \cdot \alpha$, то уравнение (2.50) преобразуется к виду

$$\eta \cdot p_*^{3\alpha} - p_*^{2\alpha} + p_*^\alpha = 0. \quad (2.59)$$

После введения замены (2.53), решая уравнение

$$\eta \cdot z^2 - z + 1 = 0, \quad (2.60)$$

определим стационарное давление для этого случая

$$p_{CT} = p_{ATM} \cdot \sqrt{\frac{1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \eta}}{2 \cdot \eta}}. \quad (2.61)$$

Случай 4. При $\nu = \frac{3}{4} \cdot \alpha$ будем иметь:

$$\eta \cdot p_*^{\frac{3}{2}\alpha} - p_*^{2\alpha} + p_*^\alpha = 0. \quad (2.62)$$

Выполнив замену

$$z = p_*^{\frac{\alpha}{2}}, \quad (2.63)$$

и решив уравнение

$$z^4 - \eta \cdot z^3 - z^2 = 0, \quad (2.64)$$

получим один действительный корень

$$z = \frac{\eta + \sqrt{\eta^2 + 4}}{2}. \quad (2.65)$$

Тогда с учетом (2.63) имеем

$$p_{CT} = p_{ATM} \cdot \sqrt[\alpha]{\left(\frac{\eta + \sqrt{\eta^2 + 4}}{2}\right)^2}. \quad (2.66)$$

На рис. 2.3 приведены графики зависимости стационарного давления в камере ГОА от плотности аэрозолеобразующего заряда для различных значений температуры горения заряда, при $u = 1 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$, $S_3 = 9.08 \text{ см}^2$, $S_B = 1.18 \text{ см}^2$, $T_\Gamma = 2200 \text{ К}$, $R = 287 \text{ Дж} \cdot (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$, $\mu = 0.97$, $\rho_\Gamma = 1819 \text{ кг/м}^3$, $p_{ATM} = 101325 \text{ Па}$, $\chi = 0.9$, $k = 1.4$.

Анализ зависимостей показал, что при высокой температуре горения заряда, прирост давления вызванный повышением плотности аэрозолеобразующего заряда практически в два раза больше, чем при температуре порядка $T_\Gamma = 1500 \text{ К}$. Так же отмечено, что полученная зависимость носит нелинейный характер, сильнее выраженный при более высокой температуре.

Исследование влияния температуры горения аэрозольобразующего заряда на стационарное давление проведем с помощью графиков на рис. 2.4.

Зависимость стационарного давления от температуры носит линейный характер, причем тангенс угла наклона, для зарядов с плотностью порядка $\rho_T=2400 \text{ кг/м}^3$ в два раза больше, чем для зарядов с плотностью $\rho_T=1600 \text{ кг/м}^3$.

Влияние площади выходных отверстий на стационарное давление в корпусе генератора исследуем с помощью графика на рис. 2.5 Очевиден нелинейный характер этой зависимости, причем с ростом площади поверхности горения и увеличении площади выходных отверстий давление падает быстрее.

Для определения зависимости стационарного давления от значения показателя степени ν в законе горения осуществим линейную интерполяцию по значениям, полученным для частных случаев 1 и 3. Общую формулу линейной интерполяции запишем в виде

$$f(x) = f(x_1) \cdot \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} + f(x_2) \cdot \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, \quad (2.67)$$

где x_1, x_2 – значение аргумента в узловых точках; $f(x_1), f(x_2)$ – значение функции в узловых точках.

Следует отметить, что данное выражение справедливо при значениях x , отвечающих следующему условию:

$$x_1 \leq x \leq x_2.$$

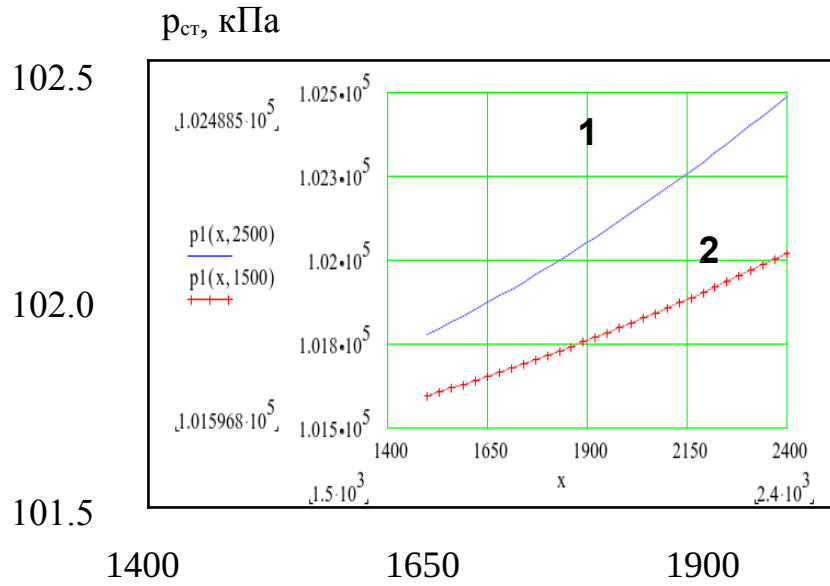


Рис. 2.3. Зависимость стационарного давления от плотности аэрозолеобразующего заряда: 1 – при температуре горения $T_г = 2500$ K; 2 – при $T_г = 1500$ K

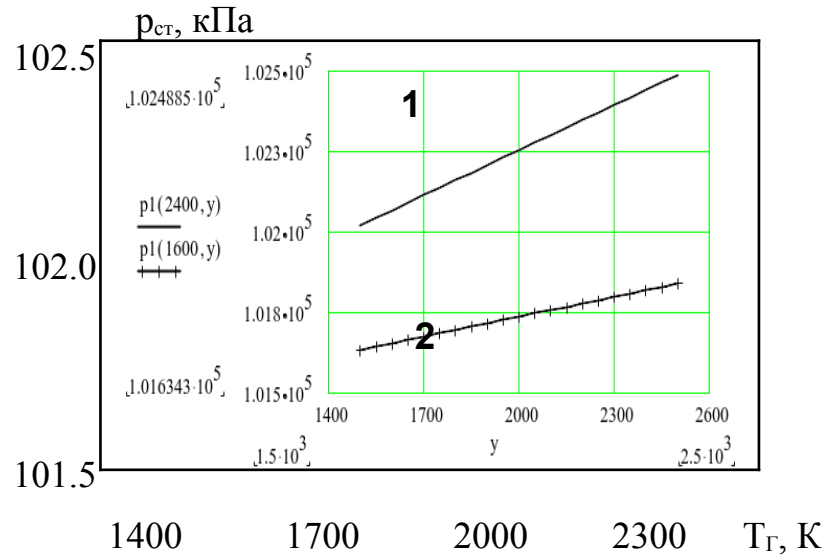


Рис. 2.4. Зависимость стационарного давления от температуры горения заряда: 1 – при плотности заряда $\rho_т = 2400$ кг/м³; 2 – при $\rho_т = 1600$ кг/м³

Зависимость стационарного давления от показателя степени $p_{ст}(\nu)$ будет определяться выражением

$$p_{ст}(\nu) = A \cdot \nu + B, \quad (2.68)$$

где

$$A = \frac{p_{ст3} - p_{ст1}}{\nu_3 - \nu_1},$$

$$B = \frac{\nu_3 \cdot p_{ст1} - \nu_1 \cdot p_{ст3}}{\nu_3 - \nu_1},$$

ν_1, ν_3 – значения показателя степени для частных случаев 1 и 3 соответственно; $p_{ст1}, p_{ст3}$ – значения стационарного давления, определяемые выражениями (2.55) и (2.61).

Для оценки погрешности данного метода сравним значения стационарного давления найденные по формуле (2.68) при $\nu = 0.286$ и $\nu = 0.214$, с результатами рассчитанными по формулам (2.58) и (2.66) при $u = 1 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$, $S_3 = 9.08 \text{ см}^2$, $S_B = 1.18 \text{ см}^2$, $T_\Gamma = 2200 \text{ К}$, $R = 287 \text{ Дж} \cdot (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$, $\mu = 0.97$, $\rho_\Gamma = 1819 \text{ кг/м}^3$, $p_{атм} = 101325 \text{ Па}$, $\chi = 0.9$, $k = 1.4$.

Разница между значениями, рассчитанными по формулам (2.58), (2.66) и значениями, вычисленными при подстановке в (2.68) $\nu = 0.214$ и $\nu = 0.286$ не превышает 0.01%. Таким образом, выражение (2.68) позволяет с достаточной для решения технических задач точностью определять стационарное давление в камере генератора для любого $\nu \in 0.14; 0.43$

График зависимости стационарного давления от показателя степени ν при указанных выше данных изображен на рис. 2.6. На нем кругами обозначены точки соответствующие значениям, вычисленным для частных случаев 1 – 4. Из анализа этого графика следует, что изменение показателя ν в три раза приводит к увеличению стационарного давления лишь на $10 \div 20 \text{ Па}$. Что позволяет сделать вывод о незначительном влиянии

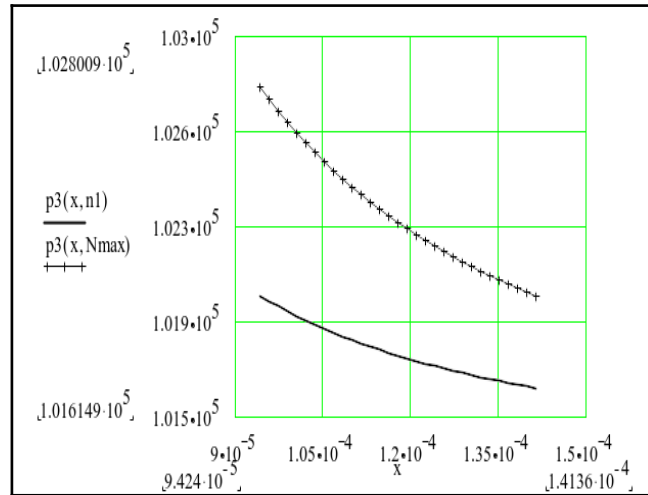


Рис. 2.5. Зависимость стационарного давления от площади выпускных отверстий при различных значениях площади поверхности горения: 1 – $S_3 = 10.9 \text{ см}^2$; 2 – $S_3 = 7.26 \text{ см}^2$

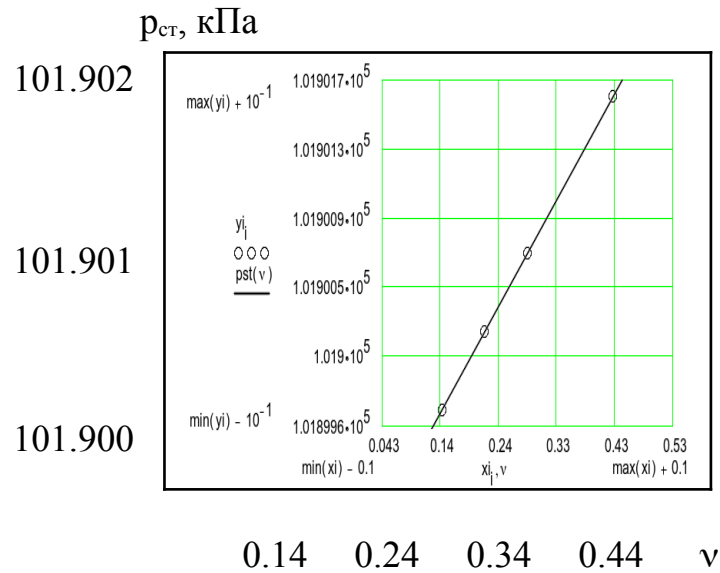


Рис. 2.6. Зависимость стационарного давления от показателя v

показателя ν на величину стационарного давления в камере генератора, в диапазоне давлений, близких к атмосферному.

Таким образом, в установившемся режиме работы ГОА температура газо-аэрозольной смеси в камере зависит от двух параметров: температуры горения заряда и коэффициента тепловых потерь об элементы конструкций корпуса. Значит, существует возможность снижения температуры аэрозоля внутри корпуса, а следовательно, и на выходе генератора путем применения аэрозолеобразующих зарядов с низкой температурой горения или при наличии дополнительных теплопоглощающих элементов внутри корпуса ГОА. Из анализа зависимости среднеобъемного давления в корпусе генератора от площади выпускных отверстий следует принципиальная возможность снижения давления в корпусе до атмосферного с последующим гашением заряда путем увеличения количества выпускных отверстий.

2.5. Динамические характеристики генератора огнетушащего аэрозоля

2.5.1. Передаточная функция ГОА по давлению

Исключим из системы (2.26) величины с отклонением температуры. Уравнение камеры по давлению в этом случае будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{1 - K_p \cdot K_T} \cdot \frac{d^2 \delta \bar{p}}{dt^2} + \frac{\tau_2 + \tau_1}{1 - K_p \cdot K_T} \cdot \frac{d \delta \bar{p}}{dt} + \delta \bar{p} = \\ = \frac{k_{2T} \cdot \tau_1}{1 - K_p \cdot K_T} \cdot \frac{d \delta \bar{T}_H}{dt} + \frac{k_{2T} + k_{1T} \cdot K_T}{1 - K_p \cdot K_T} \cdot \delta \bar{T}_H. \end{aligned} \quad (2.70)$$

Перепишем уравнение (2.70) так:

$$\tau^2 \cdot \frac{d^2 \delta \bar{p}}{dt^2} + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot \frac{d \delta \bar{p}}{dt} + \delta \bar{p} = k_{\text{вх}} \cdot \left(\tau' \cdot \frac{d \delta \bar{T}_H}{dt} + \delta \bar{T}_H \right), \quad (2.71)$$

где

$$\tau = \sqrt{\frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{1 - K_p \cdot K_T}}; \quad (2.72)$$

$$\tau' = \frac{k_{2T} \cdot \tau_1}{k_{2T} + k_{1T} \cdot K_T}; \quad (2.73)$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}} \cdot \frac{1 - \frac{\tau_1}{\tau_2}}{\sqrt{1 - K_p \cdot K_T}}; \quad (2.74)$$

$$k_{\text{вх}} = \frac{k_{2T} + k_{1T} \cdot K_T}{1 - K_p \cdot K_T}. \quad (2.75)$$

Таким образом, переходные процессы в камере сгорания ГОА, при регулировании начальной температуры заряда, описываются дифференциальным уравнением второго порядка.

Применяя к дифференциальному уравнению (2.71) интегральное преобразование Лапласа, полагая при этом, что начальные условия – нулевые, в результате получим:

$$(\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot s + 1) \cdot X(s) = k_{\text{вх}} \cdot (\tau' \cdot s + 1) \cdot Z(s), \quad (2.76)$$

где s – комплексная переменная; $X(s)$ – изображение выходного сигнала $\delta \bar{p}$; $Z(s)$ – изображение входного сигнала $\delta \bar{T}_H$.

Отсюда, на основании определения [1], запишем передаточную функцию камеры сгорания ГОА по давлению:

$$W_p(s) = \frac{k_{\text{вх}} \cdot (\tau' \cdot s + 1)}{\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \tau \cdot \zeta \cdot s + 1}. \quad (2.77)$$

В соответствии с обозначениями (2.34–2.36) и (2.42–2.44) перепишем (2.72)–(2.75):

$$\tau = \frac{p_{ст} \cdot V_{к}}{T_{ст} \cdot m_{ст}^* \cdot R} \cdot \sqrt{\frac{2}{\varphi_p - 2 \cdot k \cdot v}}; \quad (2.78)$$

$$\tau' = \frac{p_{ст} \cdot V_{к}}{T_{ст} \cdot m_{ст}^* \cdot R}; \quad (2.79)$$

$$\zeta = \frac{\varphi_p + 1 + k \cdot (1 - 2 \cdot v)}{2\sqrt{2} \cdot \sqrt{\varphi_p - 2 \cdot k \cdot v}}; \quad (2.80)$$

$$k_{вх} = \frac{2 \cdot k \cdot \beta \cdot T_H}{\varphi_p - 2 \cdot k \cdot v}. \quad (2.81)$$

Так как характеристики устройства с передаточной функцией (2.77) определяются значением постоянных коэффициентов характеристического полинома, то исследуем значения, которые может принимать коэффициент затухания ζ в зависимости от значений стационарного давления, показателя адиабаты и показателя v с помощью графической зависимости на рис. 2.7

Анализ зависимости, представленной на рис. 2.7, показал, что при изменении v от 0 до 1 коэффициент ζ достигает минимума. Для определения минимального значения ζ , проведем исследование выражения (2.80), представив его как функциональную зависимость $\zeta(v)$. Продифференцируем (2.80) по v , получим:

$$\frac{d\zeta}{dv} = \frac{k}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\varphi_p - 2 \cdot k \cdot v}} \cdot \left[\frac{\varphi_p + 1 + k \cdot (1 - 2 \cdot v)}{2 \cdot (\varphi_p - 2 \cdot k \cdot v)} - 1 \right]. \quad (2.82)$$

Приравнявая выражение (2.82) к нулю, найдем из него критическое значение коэффициента $v_{кр}$:

$$v_{кр} = \frac{1}{2 \cdot k} \cdot (\varphi_p - 1 - k) \quad (2.83)$$

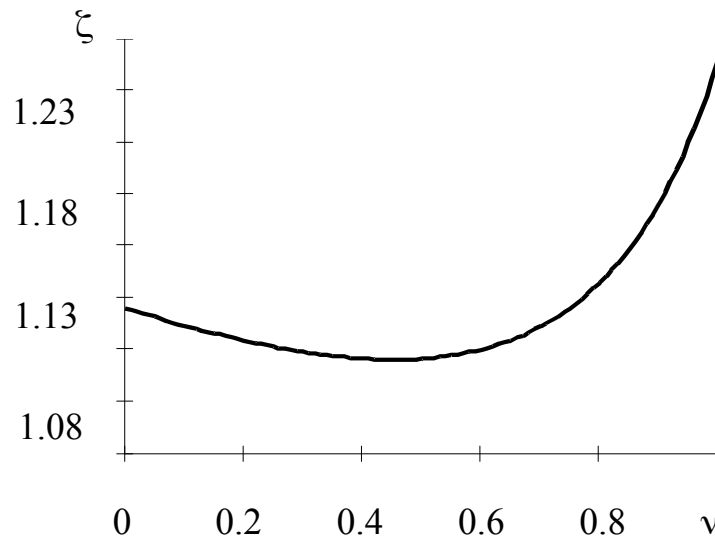


Рис. 2.7. Зависимость коэффициента затухания ζ от показателя ν при стационарном давлении $p_{ст} = 130$ кПа и показателе адиабаты $k=1.3$

Подставим (2.83) в (2.80) получим выражение для расчета минимального значения коэффициента затухания

$$\zeta_{min} = \sqrt{\frac{k+1}{2}}. \quad (2.84)$$

Очевидно, что минимальное значение коэффициента затухания зависит только от значения показателя адиабаты. Учитывая, что в результате сгорания аэрозолеобразующего заряда в камере генератора образуются двух- и трехатомные газы, для которых, согласно [2], показатель адиабаты равен 1.4 и 1.3, минимальное значение коэффициента затухания будет всегда больше единицы.

Таким образом, динамические свойства генератора огнетушащего аэрозоля адекватно определяются характеристиками совокупности двух апериодических звеньев с постоянными времени τ_1 и τ_2 и форсирующего

звена первого порядка с коэффициентом передачи $k_{\text{вх}}$ и постоянной времени τ' .

2.5.2. Передаточная функция ГОА по температуре

Если из системы уравнений (2.45) исключить величины с отклонением давления, то уравнение камеры по температуре в этом случае, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{1 - K_p \cdot K_T} \cdot \frac{d^2 \delta \bar{T}}{dt^2} + \frac{\tau_2 + \tau_1}{1 - K_p \cdot K_T} \cdot \frac{d \delta \bar{T}}{dt} + \delta \bar{T} = \\ = \frac{k_{1T} \cdot \tau_2}{1 - K_p \cdot K_T} \cdot \frac{d \delta \bar{T}_H}{dt} + \frac{k_{1T} - k_{2T} K_p}{1 - K_p \cdot K_T} \cdot \delta \bar{T}_H. \end{aligned} \quad (2.85)$$

Сравнивая полученное выражение с (2.70) можно заметить, что постоянные коэффициенты в левых частях равны. Введем следующие обозначения:

$$k'_{\text{вх}} = \frac{k_{1T} - K_p \cdot k_{2T}}{1 - K_p \cdot K_T}; \quad (2.86)$$

$$\tau'' = \frac{k_{1T} \cdot \tau_2}{1 - K_p \cdot K_T}. \quad (2.87)$$

Тогда уравнение (2.85) можно переписать:

$$\tau^2 \cdot \frac{d^2 \delta \bar{T}}{dt^2} + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot \frac{d \delta \bar{T}}{dt} + \delta \bar{T} = \tau'' \cdot \frac{d \delta \bar{T}_H}{dt} + k'_{\text{вх}} \cdot \delta \bar{T}_H. \quad (2.88)$$

С учетом (2.35), (2.36), (2.43) и (2.44), постоянные коэффициенты в правой части (2.86) будут равны:

$$k'_{\text{вх}} = \frac{k-1}{k+1} \cdot 2 \cdot \beta \cdot T_{\text{H}} - \frac{2 \cdot k \cdot \beta \cdot T_{\text{H}}}{\varphi_{\text{p}} - 2 \cdot k \cdot v} \cdot \frac{\varphi_{\text{p}} - 2 \cdot k \cdot v}{k} \cdot \frac{k-1}{k+1} = 0.$$

А с учетом выражения (2.42) правая часть (2.87) будет иметь вид:

$$\tau'' = \frac{2 \cdot p_{\text{ст}} \cdot V_{\text{K}} \cdot (k-1) \cdot \beta \cdot T_{\text{H}}}{T_{\text{ст}} \cdot m_{\text{ст}} \cdot R \cdot (\varphi_{\text{p}} - 2 \cdot k \cdot v)}. \quad (2.89)$$

Применяя к (2.88) прямое преобразование Лапласа, с учетом того, что $k'_{\text{вх}} = 0$, получим:

$$(\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot s + 1) \cdot X(s) = \tau'' \cdot s \cdot Z(s), \quad (2.90)$$

где $X(s)$ – изображение выходного сигнала $\delta \overline{T}$; $Z(s)$ – изображение входного сигнала $\delta \overline{T}_{\text{H}}$.

Откуда, передаточная функция камеры по температуре будет равна:

$$W_T(s) = \frac{X(s)}{Z(s)} = \frac{\tau'' \cdot s}{\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \tau \cdot \zeta \cdot s + 1}. \quad (2.91)$$

Таким образом, математическая модель генератора, для случая, когда выходным сигналом будет температура газо-аэрозольной смеси, может быть представлена в виде совокупности апериодических звеньев с различными постоянными времени и дифференцирующего звена с постоянной времени τ'' .

2.5.3. Временные характеристики ГОА

Получим динамические характеристики камеры сгорания во временной области при входном воздействии в виде единичной ступенчатой функции. Реакцию на подобный сигнал принято называть единичной переходной функцией [41].

Реакцию на единичный ступенчатый сигнал запишем в виде:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W(s)}{s} \right\}, \quad (2.92)$$

где L^{-1} – оператор обратного преобразования Лапласа.

Подставим в (2.92) вместо $W(s)$ выражение из (2.77), после ряда преобразований имеем:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{k_{\text{BX}} \cdot (\tau' \cdot s + 1)}{\tau^2 \cdot s \cdot \left(s + \frac{1}{T_1}\right) \cdot \left(s + \frac{1}{T_2}\right)} \right\}, \quad (2.93)$$

где

$$T_1 = \frac{\tau}{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}; \quad (2.94)$$

$$T_2 = \frac{\tau}{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}. \quad (2.95)$$

Вынесем постоянные коэффициенты за знак обратного преобразования Лапласа и представим выражение в фигурных скобках в (2.93) в виде суммы:

$$h(t) = \frac{k_{\text{BX}}}{\tau^2} \cdot L^{-1} \left\{ \frac{\tau'}{\left(s + \frac{1}{T_1}\right) \cdot \left(s + \frac{1}{T_2}\right)} + \frac{1}{s \cdot \left(s + \frac{1}{T_1}\right) \cdot \left(s + \frac{1}{T_2}\right)} \right\}. \quad (2.96)$$

Используя таблицы соответствия оригиналов основных элементарных функций и их изображений [1], согласно теореме о свертывании оригиналов запишем:

$$h(t) = \frac{k_{BX}}{\tau^2} \cdot \left[T_2 \cdot \int_0^t e^{-\frac{t-t'}{T_1}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t'}{T_2}} \right) \cdot dt' + \int_0^t e^{-\frac{t-t'}{T_1}} \cdot e^{-\frac{t-t'}{T_2}} \cdot dt' \right]. \quad (2.97)$$

После интегрирования получим:

$$h(t) = k_{BX} \cdot \left(1 - T_1' \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + T_2' \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \quad (2.98)$$

где k_{BX} – коэффициент усиления по входному воздействию, определяемый выражением (2.81);

$$T_1' = \frac{T_1 - \tau'}{T_1 - T_2}; \quad (2.99)$$

$$T_2' = \frac{T_2 - \tau'}{T_1 - T_2}. \quad (2.100)$$

Нормальная реакция любого устройства на произвольное воздействие $z(t)$ определяется выражением:

$$x(t) = \int_{t_0}^t \omega(t - \tau) \cdot z(\tau) \cdot d\tau, \quad (2.101)$$

где $z(t)$ – входной сигнал; $\omega(t)$ – импульсная переходная функция; t_0 – момент начала входного воздействия.

Под импульсной переходной характеристикой будем понимать реакцию устройства на входной сигнал в виде единичного импульса $\delta(t)$, который обладает следующими свойствами:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0; \\ 0, & t \neq 0. \end{cases} \quad (2.102)$$

Импульсная переходная функция связана с единичной переходной функцией следующим соотношением [1]:

$$\omega(t) = \frac{d h(t)}{d t}. \quad (2.103)$$

Продифференцировав (2.98), имеем выражение импульсной переходной функции:

$$\omega(t) = k_{\text{вх}} \cdot \left(\frac{T_1'}{T_1} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{T_2'}{T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (2.104)$$

Рассмотрим случай, когда входное воздействие представляет ступенчатый сигнала [23]. То есть следующую зависимость от времени:

$$z(t) = k_0 \cdot l(t), \quad (2.105)$$

где k_0 – коэффициент передачи;

$$l(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0; \\ 1, & t > 0. \end{cases} \quad (2.106)$$

Подставим (2.104) и (2.105) в формулу (2.101), после интегрирования получим:

$$x(t) = k_0 \cdot k_{BX} \cdot \left[T_1' \cdot e^{-\frac{t_0}{T_1}} - T_1' \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2' \cdot e^{-\frac{t_0}{T_2}} + T_2' \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right]. \quad (2.107)$$

Если входной сигнал был подан в момент времени $t_0 = 0$, то выражение (2.107) можно переписать следующим образом:

$$x(t) = k_{BX} \cdot k_0 \cdot \left(1 - T_1' \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + T_2' \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (2.108)$$

Сравнивая полученное выражение и выражение (2.98) можно сделать вывод о том, что при подаче единичного ступенчатого сигнала в момент времени равный нулю и при $k_0 = 1$, выходные сигналы совпадают.

Графики зависимостей переходных характеристик при различных значениях параметров заряда и корпуса генератора представлены на рис. 2.8 – 2.10.

На рис. 2.8 изображены временные характеристики при различных значениях плотности аэрозолеобразующего заряда, где цифрой 1 – обозначен график переходного процесса при $\rho_T = 3000 \text{ кг/м}^3$, а 2 – при $\rho_T = 1500 \text{ кг/м}^3$.

Анализ графика показал, что при увеличении плотности заряда в два раза значение выходного сигнала увеличивается в четыре раза, при этом очевидно, что длительность переходного процесса с повышением плотности возрастает.

Временные характеристики ГОА для различных значений скорости горения представлены на рис. 2.9. На нем цифрой 1 – обозначен график при $u = 1.5 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$, 2 – при $u = 0.5 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$.

Из представленных зависимостей видно, что увеличение скорости горения приводит к увеличению коэффициента передачи. Но при этом длительность переходного процесса значительно возрастает.

На рис. 2.10 приведен график, который характеризует изменение давления в камере генератора при изменении температуры горения заряда. На графике цифрой 1 обозначен переходный процесс при температуре горения заряда $T_{\Gamma} = 3000 \text{ K}$, а цифрой 2 – при $T_{\Gamma} = 500 \text{ K}$. Анализ графиков показал, что снижение температуры горения заряда в 6 раз приводит к увеличению длительности переходного процесса в 3 раза. Вместе с этим снижение температуры приводит к уменьшению значения коэффициента передачи более чем в 4 раза.

Подставим в (2.92) передаточную функцию (2.91)

$$h^T(t) = \frac{\tau''}{\tau} \cdot \int_0^t e^{-\frac{t-t'}{T_1}} \cdot e^{-\frac{t'-t}{T_2}} \cdot dt', \quad (2.109)$$

где τ'' – определяется выражением (2.87); τ – определяется выражением (2.78).

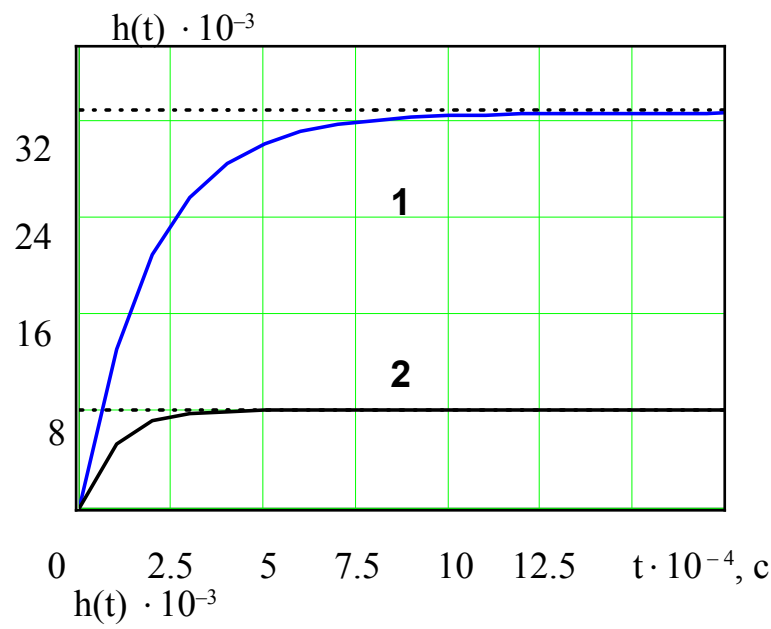
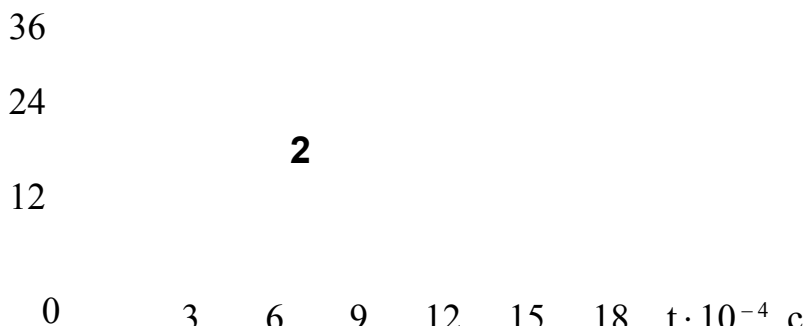


Рис. 2.8. График единичной переходной функции при различных значениях плотности аэрозолеобразующего заряда



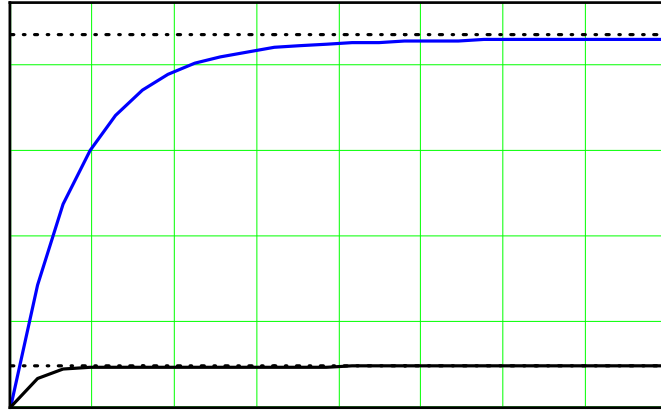


Рис. 2.9. График единичной переходной функции для различных значений скорости горения заряда

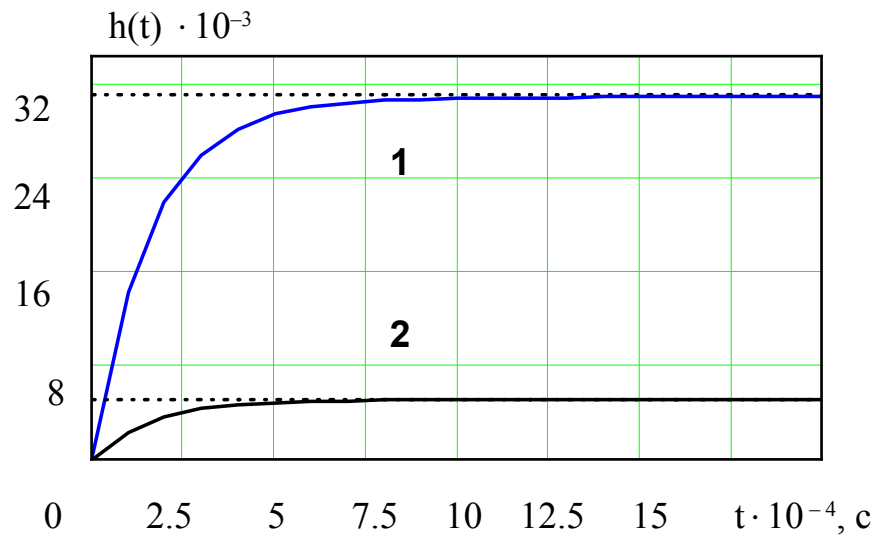


Рис. 2.10. График единичной переходной функции при различных значениях температуры горения аэрозолеобразующего заряда

После интегрирования получим выражение единичной переходной функции для случая, когда выходной сигнал – среднеобъемная температура в камере ГОА.

$$h^T(t) = \frac{\tau''}{T_1 - T_2} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (2.110)$$

Импульсная переходная функция для системы (2.85), согласно (2.103) будет иметь вид:

$$\omega^T(t) = \frac{\tau''}{T_1 - T_2} \cdot \left(\frac{1}{T_1} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{1}{T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad (2.111)$$

Тогда выражение, описывающие изменения среднеобъемной температуры в камере генератора, при ступенчатом входном воздействии (2.105), в нулевой момент времени, будет иметь вид:

$$T_0(t) = \frac{\tau'' \cdot k_0}{T_1 - T_2} \cdot \left(e^{\frac{-t}{T_1}} - e^{\frac{-t}{T_2}} \right). \quad (2.112)$$

Таким образом, выражения (2.108) и (2.112) позволяют находить значения среднеобъемного давления и среднеобъемной температуры продуктов горения аэрозолеобразующего заряда в камере ГОА, при скачкообразном изменении начальной температуры заряда.

2.5.4. Оценка длительности переходного процесса в камере сгорания ГОА

Длительностью переходного процесса называется интервал времени между моментом подачи входного сигнала и моментом времени, в который выходной сигнал системы не будет отличаться от его установившегося значения не более, чем на величину δ , где δ – заданная малая постоянная величина.

Таким образом, длительность переходного процесса можно определить из следующего условия:

$$|h(t_{\text{пп}}) - h(\infty)| \leq \varepsilon, \quad (2.113)$$

где $t_{\text{пп}}$ – длительность переходного процесса; $h(\infty)$ – установившееся значение переходной функции; ε – величина, которая определяется выражением:

$$\varepsilon = \delta \cdot h(\infty). \quad (2.114)$$

Анализ соотношения предэкспоненциальных множителей при втором и третьем слагаемых выражения (2.98) проведем с помощью графической зависимости на рис. 2.11.

Анализ графика показал, что при $\zeta > 1$ будет иметь место $\frac{T_1}{T_2} \gg 1$, следовательно, третьим слагаемым в (2.98) можно пренебречь, тогда это выражение можно переписать следующим образом:

$$h'(t) = k_{BX} \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} \right). \quad (2.115)$$

Для монотонного переходного процесса перепишем выражение (2.113) с учетом (2.114) и (2.115) в следующем виде:

$$k_{BX} \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_1 + T_2} \cdot e^{-\frac{t_{\text{ин}}}{T_1}} \right) - h(\infty) = \delta \cdot h(\infty). \quad (2.116)$$

При условии

$$h(\infty) = k_{BX}, \quad (2.117)$$

имеем после логарифмирования из (2.116)

$$t_{\text{ин}} = T_1 \cdot \ln \left[\frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot \frac{1}{\delta} \right]. \quad (2.118)$$

При решении технических задач величину δ можно принимать равной 5% от установившегося значения переходной функции. С учетом этого, а также выражений (2.100) и (2.101) длительность переходного процесса может быть определена из следующего выражения [24]:

$$t_{\text{ин}} = \frac{\tau}{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot \ln \left[10 \cdot \left(\frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} + 1 \right) \right]. \quad (2.119)$$

Анализ выражения (2.119) показывает, что длительность переходного процесса, для устройства с передаточной функцией (2.77), зависит только от величины постоянной времени и коэффициента затухания. С учетом того, что минимальное значения коэффициента ξ , согласно выражению (2.84), зависит только от показателя адиабаты и при $k = 1.3$ равно 1.072. Подставив в (2.119) $\xi_{\min} = 1.072$ получим:

$$t_{\min} = 5.3 \cdot \tau \quad (2.120)$$

Таким образом, минимальное значение длительности переходного процесса определяется значением постоянной времени камеры генератора

Анализ графиков, представленных на рис. 2.12-2.13, показал, что на длительность переходного процесса существенное влияние оказывают физико-химические свойства аэрозолеобразующего заряда: плотность, температура и скорость его горения. Например, увеличение плотности и температуры горения в 3 раза приводит к изменению исследуемого показателя практически на порядок. Увеличение скорости горения при атмосферном давлении на порядок приводит к снижению длительности переходного процесса в 10 раз. Изменение площади поверхности горения

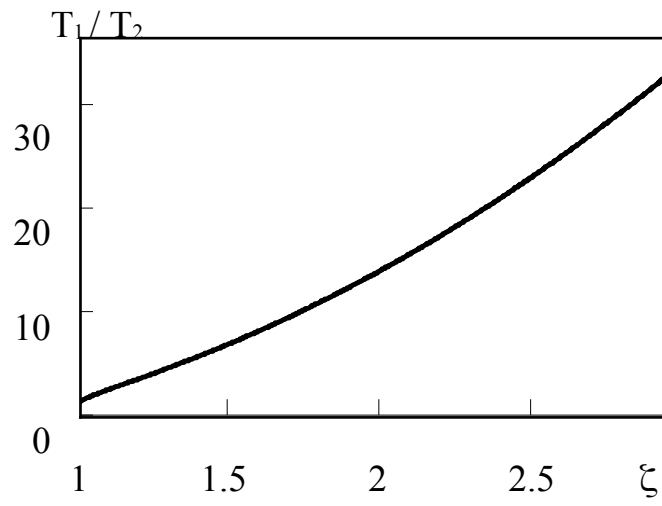


Рис. 2.11. Зависимость T_1/T_2 от коэффициента ζ

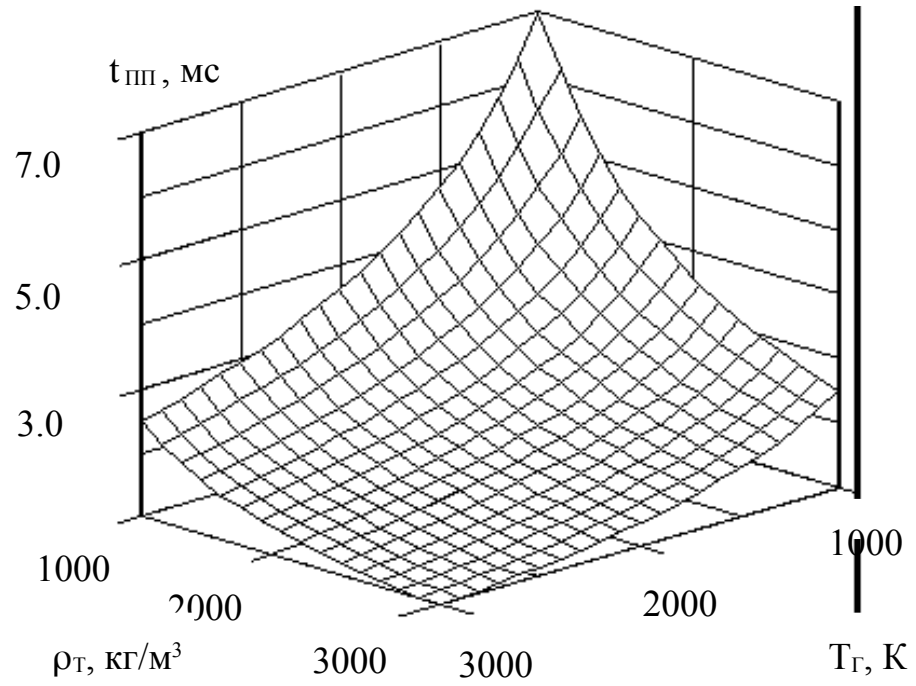


Рис. 2.12. Зависимость длительности переходного процесса в камере генератора от плотности и температуры горения заряда

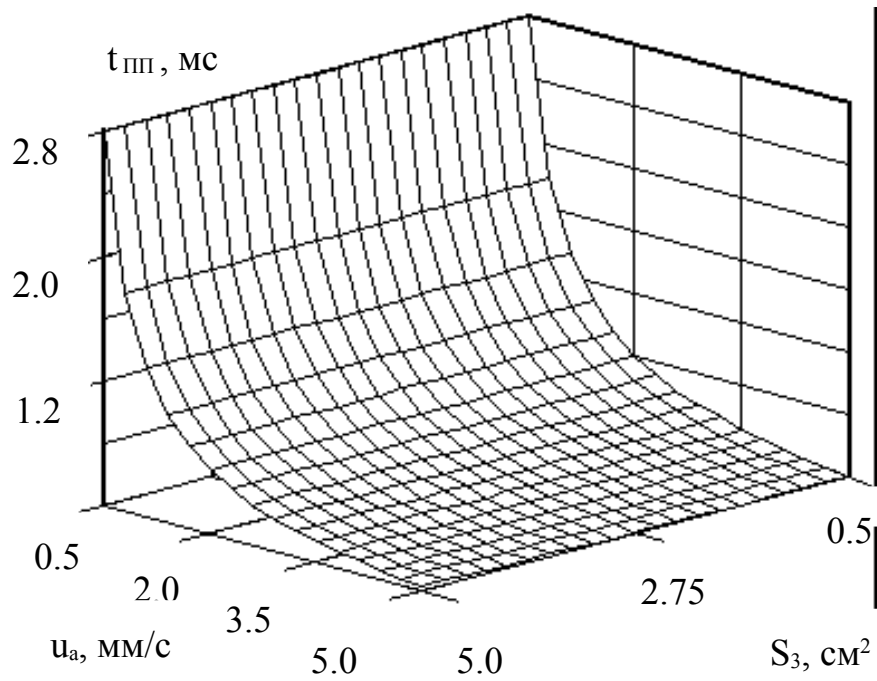


Рис. 2.13. Зависимость длительности переходного процесса в камере генератора от скорости и площади поверхности горения заряда

незначительно отражается на изменении длительности переходного процесса.

2.6. Выводы

2.6.1. Показано, что наибольший интерес с точки зрения моделирования рабочих процессов представляет основной период работы генератора, при этом считается, что рабочие процессы в камере квазистационарные, поток аэрозоля одномерный, аэрозоль обладает свойствами идеального газа.

2.6.2. Показано, что для создания математической модели рабочих процессов, протекающих в камере сгорания генератора, можно применить нульмерный подход.

2.6.3. Показано, что выражение скорости горения аэрозолеобразующего заряда представляет собой функциональную зависимость от среднеобъемного давления в камере сгорания и начальной температуры заряда.

2.6.4. Показано, что математической моделью рабочих процессов в камере сгорания генератора является зависимость среднеобъемного давления, температуры, представленная в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений.

2.6.5. Динамические свойства камеры сгорания генератора огнетушащего аэрозоля описываются системой, состоящей из двух линейных дифференциальных уравнений.

2.6.6. Показано, что в установившемся режиме среднеобъемная температура газо-аэрозольной смеси зависит от температуры горения заряда и коэффициента тепловых потерь об элементы конструкции генератора. Таким образом, существует возможность снижения температуры аэрозоля на выходе генератора путем применения

аэрозолеобразующих зарядов с низкой температурой горения или при наличии дополнительных теплопоглощающих элементов.

2.6.7. Анализ зависимости среднеобъемного давления в корпусе генератора показал, что при изменении параметров заряда АОС значение давления изменяется на 2% относительно $p_{\text{атм}}$.

2.6.8. Показано, что передаточная функция камеры сгорания генератора может быть представлена в виде совокупности двух аperiodических звеньев (с различными постоянными времени) и форсирующего звена первого порядка.

2.6.9. Для случая, когда выходным сигналом будет температура газо-аэрозольной смеси, модель, описывающая динамические процессы в камере генератора, может быть представлена в виде произведения передаточных функций аperiodических звеньев и дифференцирующего звена.

2.6.10. Получены аналитические выражения для среднеобъемного давления и температуры продуктов сгорания аэрозолеобразующего заряда в камере генератора, при скачкообразном изменении начальной температуры заряда.

2.6.11. Показано, что в случае, когда значение показателя адиабаты $k=1.3$ длительность переходного процесса прямо пропорциональна постоянной времени τ . Проведенный анализ показал, что на длительность переходного процесса в камере сгорания генератора существенное влияние оказывают плотность и температура горения, а так же скорость горения заряда.

РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА ОГNETУШАЩЕГО АЭРОЗОЛЯ

3.1. Исследование влияния геометрических размеров корпуса и свойств аэрозолеобразующего заряда генератора на величину массового расхода и скорость сгорания заряда АОС

Одной из основных характеристик генератора является его способность подать определенное количество огнетушащего вещества за единицу времени [32]. Определим массовый расход в установившемся режиме, подставив в (2.46) справа значения давления, найденные для частных случаев 1 – 4. Получим для 1-го случая

$$M_{\text{ст}} = \rho_{\text{т}} \cdot S_3 \cdot u_1 \cdot \sqrt{1 + \eta}. \quad (3.1)$$

Для случая когда $\nu = \alpha$

$$M_{\text{ст}} = \frac{\rho_{\text{т}} \cdot S_3 \cdot u_1}{1 - \eta}. \quad (3.2)$$

В случае $\nu = \frac{3 \cdot \alpha}{4}$, расход будет определяться выражением:

$$M_{\text{ст}} = \rho_{\text{т}} \cdot S_3 \cdot u_1 \cdot \left[\frac{\eta + \sqrt{4 + \eta^2}}{2} \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (3.3)$$

При $\nu = \frac{3 \cdot \alpha}{2}$ будем иметь:

$$M_{\text{ст}} = \rho_{\text{т}} \cdot S_3 \cdot u_1 \cdot \left[\frac{1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \eta}}{2 \cdot \eta} \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (3.4)$$

Исследование влияния параметров корпуса генератора и характеристик топлива на величину массового секундного расхода проведем с помощью соответствующих графиков.

На рис 3.1 представлен график зависимости массового расхода от площади поверхности горения при $u_a = 1 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$, $T_{\Gamma} = 2200 \text{ К}$, $S_B = 1.18 \text{ см}^2$, $R = 287 \text{ Дж} \cdot (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$, $\mu = 0.97$, $\rho_T = 1819 \text{ кг/м}^3$, $p_{\text{АТМ}} = 101325 \text{ Па}$, $\chi = 0.9$, $k = 1.4$, $\nu = 0.286$.

Зависимость на рассматриваемом диапазоне носит линейный характер. При изменении площади поверхности горения на $\pm 20 \%$ относительно $S_3 = 9.08 \text{ см}^2$ массовый расход увеличивается более чем в 1.5 раза.

Исследуем влияние на величину массового расхода площади выпускных отверстий с помощью графических зависимостей представленных на рис. 3.2

Анализ этих зависимостей показывает, что с ростом площади выходных отверстий массовый расход убывает, причем для зарядов с большим значением показателя ν , снижение расхода происходит быстрее. Изменение S_B более чем на 50 % относительно $S_B = 1.18 \text{ см}^2$ приводит к изменению расхода на сотые доли процента, что позволяет сделать вывод о неэффективности влияния на величину массового расхода, при докритическом режиме истечения аэрозоля, путем изменения площади выпускных отверстий.

Определим степень влияния температуры горения твердотопливного заряда на величину массового расхода. Соответствующая графическая зависимость представлена на рис. 3.3.

Несмотря на то, что для обоих случаев наблюдается рост массового расхода при увеличении температуры горения, прирост расхода составляет всего 0.001 % при повышении температуры на 1000 К. Это позволяет сделать вывод о том, что снижение температуры горения ТТЗ, а следовательно, и температуры газоаэрозольной смеси на выходе

1.6

1.4

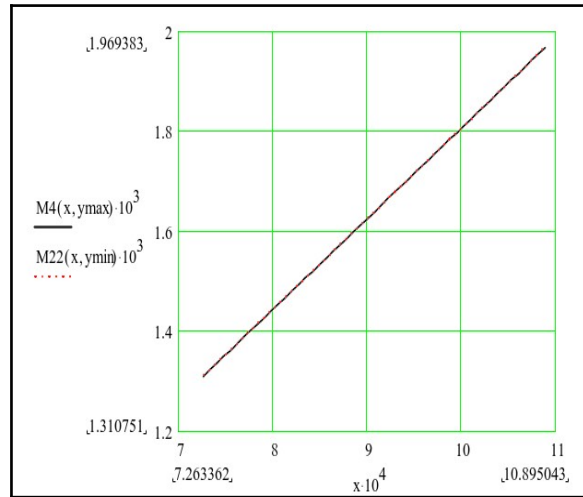


Рис. 3.1 Зависимость массового расхода от площади поверхности горения

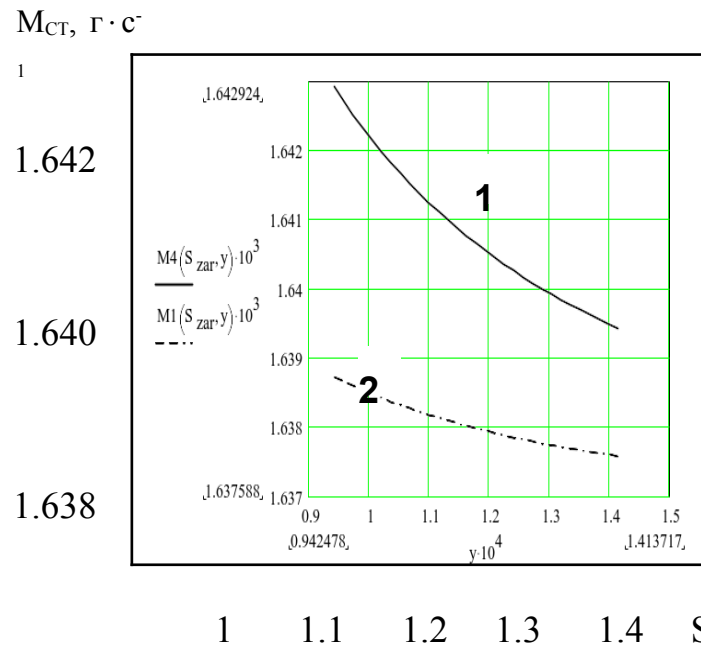


Рис. 3.2. Зависимость массового расхода от площади выпускных отверстий: 1 – $\nu = 0.43$; 2 – $\nu = 0.14$

генератора, не вызовет скольнибудь существенного снижения массового расхода.

Определенный интерес вызывает исследование влияния параметров, характеризующих скорость горения аэрозолеобразующего заряда, на величину массового расхода (рис. 3.4).

Анализ зависимости на рис. 3.4 показывает, что рост скорости горения u_a , приводит к пропорциональному увеличению массового расхода, причем большему значению плотности заряда, прямая 1, соответствует больший прирост расхода.

Исследуем влияние начальной температуры заряда на величину массового расхода с помощью графика представленного на рис. 3.5.

Анализ рассмотренных графических зависимостей показал, что влияние показателя ν незначительно, прямые 1 и 2 практически совпадают, а положение прямых, соответствующих разным значениям плотности заряда, близко к параллельному и в обоих случаях с ростом начальной температуры заряда приводит к повышению значения массового расхода на 10 %.

Таким образом, массовый секундный расход в установившемся режиме работы генератора, в зависимости от значения показателя ν , определяется выражениями (3.1) – (3.4). Установлено, что величина массового расхода, при докритическом режиме истечения газозеролевой смеси из выпускных отверстий, существенно зависит от плотности аэрозолеобразующего заряда, площади поверхности горения заряда, начальной температуры заряда и скорости его горения при атмосферном давлении. Варьирование указанных параметров приводит к изменению массового секундного расхода на 10 – 50 %.

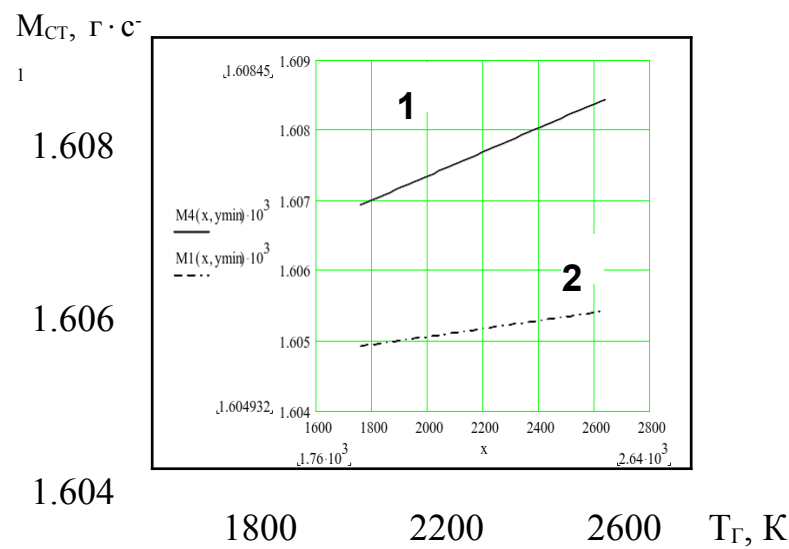


Рис. 3.3. Зависимость массового расхода от температуры горения заряда: 1 – $\nu = 0.43$; 2 – $\nu = 0.14$

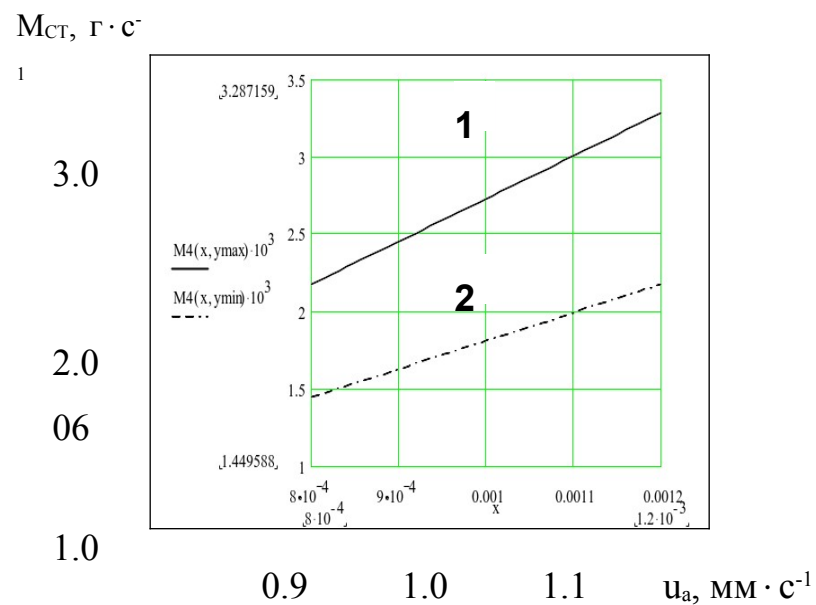


Рис. 3.4. Зависимость массового расхода от скорости горения заряда: 1 – $\rho_T = 2200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; 2 – $\rho_T = 1450 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$

Слабое влияние на величину массового расхода, которое оказывает изменение температуры горения аэрозольобразующего заряда, позволяет добиться снижения температуры газоаэрозольной смеси на выходе генератора без значительного уменьшения расхода.

Аналитическое выражение для скорости горения аэрозольобразующего заряда, в установившемся режиме работы ГОА, легко получить, подставив в (2.8) значения стационарного давления (2.55), (2.58) (2.61) или (2.66), в зависимости от значения показателя ν . Определим степень влияния на скорость горения заряда параметров генератора и заряда с помощью графических зависимостей, которые получены при следующих постоянных $u_a = 1 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$, $\beta = 10^{-3}$, $T_r = 2200 \text{ К}$, $S_B = 1.18 \text{ см}^2$, $R = 287 \text{ Дж} \cdot (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$, $\mu = 0.97$, $\rho_r = 1819 \text{ кг/м}^3$, $\chi = 0.9$, $p_{\text{атм}} = 101325 \text{ Па}$, $k = 1.4$, $\nu = 0.286$.

На рис. 3.6 представлена зависимость скорости горения от температуры горения заряда, где цифрой 1 обозначен график при $\nu = 0.43$, а 2 – при $\nu = 0.14$.

Очевидно, что при любых ν , принадлежащих исследуемому диапазону, повышение температуры горения заряда приводит к незначительному повышению скорости горения.

Зависимость скорости горения от начальной температуры заряда при значении плотности заряда $\rho_r = 2200 \text{ кг/м}^3$ – график 1 и $\rho_r = 1450 \text{ кг/м}^3$ график 2, представлена на рис. 3.7.

Повышение начальной температуры заряда на 100 К приводит к увеличению скорости его горения на 8 %. Вместе с тем повышение плотности заряда в 1.5 раза хотя и приводит к увеличению скорости горения, но это повышение весьма незначительно. Это позволяет сделать вывод о том, что скорость горения заряда чувствительна к изменению условий внешней среды – начальной температуре заряда, а изменение характеристик самого заряда: плотности, температуры горения и

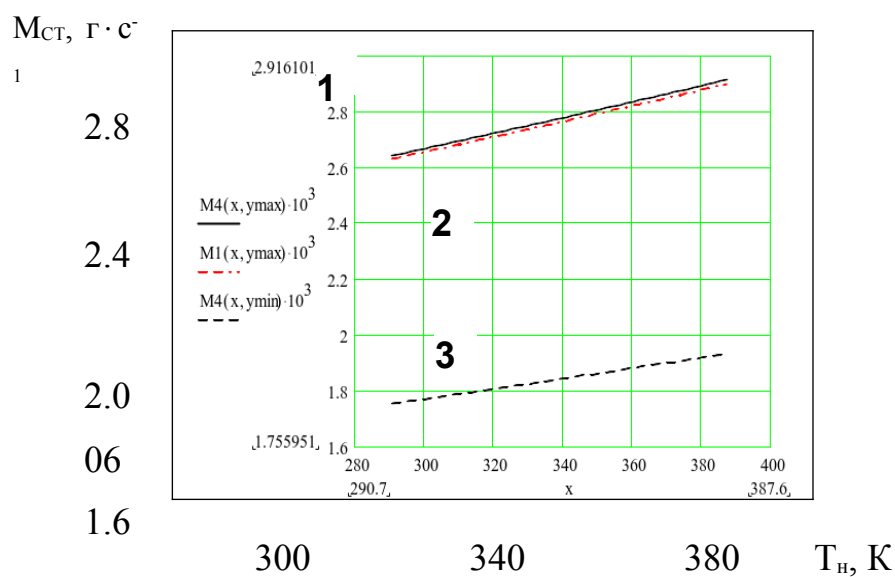


Рис. 3.5. Зависимость массового расхода от начальной температуры заряда: 1 – $\rho_T = 2200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ $\nu = 0.43$; 2 – $\rho_T = 2200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ $\nu = 0.14$; 3 – $\rho_T = 1450 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ $\nu = 0.43$

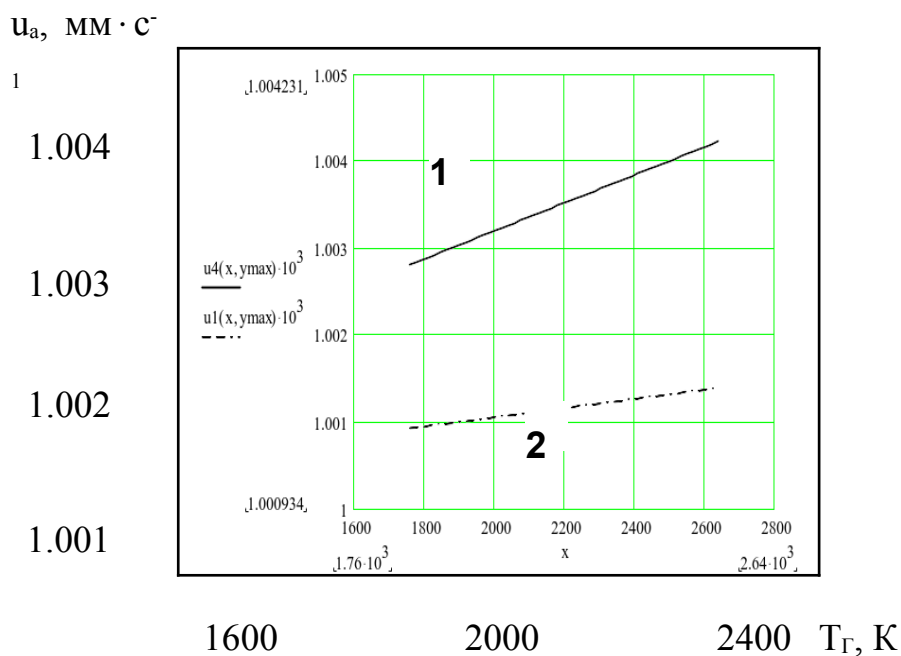


Рис. 3.6. Зависимость скорости горения заряда от температуры его горения: 1 – $\nu = 0,43$; 2 – $\nu = 0,14$

показателя ν в законе горения, приводит к незначительному изменению скорости горения.

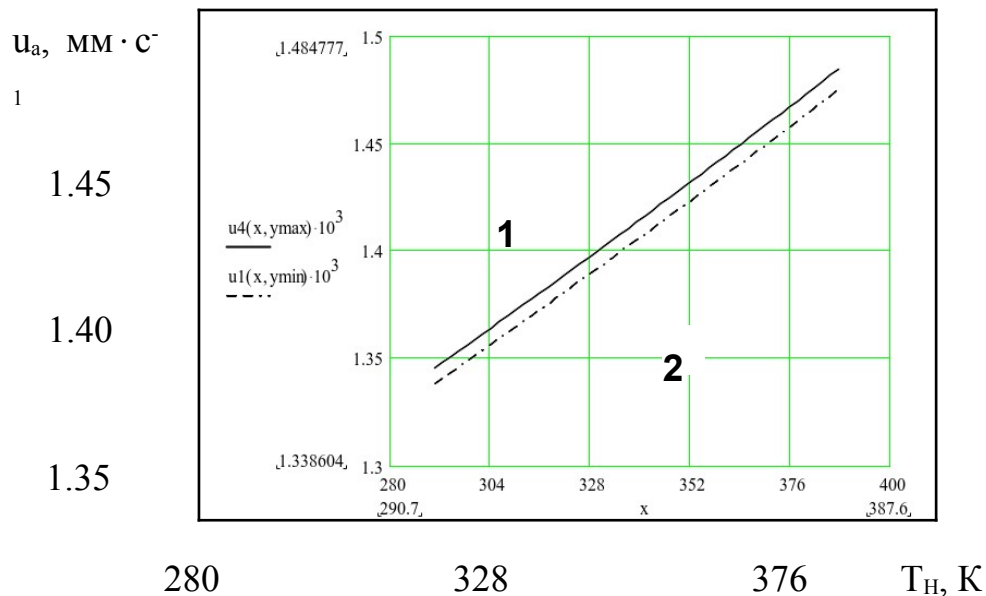


Рис. 3.7. Зависимость скорости горения заряда от его начальной температуры: 1 – $\rho_T = 2200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; 2 – $\rho_T = 1450 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$

3.2. Исследование длительности работы генератора огнетушащего аэрозоля

На стационарном режиме работы среднеобъемная температура и давление газозеролевой смеси остаются постоянными и определяются выражениями (2.48) и (2.55), (2.58), (2.61), (2.66). Из третьего уравнения системы (2.19), с учетом (2.8) получим:

$$\frac{dV_K}{dt} = S_3 \cdot u_a \cdot \left(\frac{p_{CT}}{p_{ATM}} \right)^{\nu} e^{\beta \cdot T_n}. \quad (3.5)$$

Исходя из геометрического смысла первой производной, изменение свободного объема камеры можно представить в виде:

$$\frac{dV_K}{dt} = \frac{V_K - V_K^0}{t_p}, \quad (3.6)$$

где t_p – время выгорания заряда; V_K^0 – начальный свободный объем камеры.

С другой стороны, выражение стоящее справа в числителе, согласно геометрической модели корпуса ГОА генератора можно записать:

$$V_{ЗАР} = V_K - V_K^0, \quad (3.7)$$

где $V_{ЗАР}$ – объем аэрозолеобразующего заряда.

С учетом того, что шашка аэрозолеобразующего заряда представляет собой правильный круговой цилиндр, запишем:

$$V_{ЗАР} = \ell \cdot S_3, \quad (3.8)$$

где ℓ – длина шашки твердотопливного заряда.

Таким образом, с учетом (3.7) и (3.8) формула (3.6) будет выглядеть так

$$\frac{dV_K}{dt} = \frac{\ell \cdot S_3}{t_p}. \quad (3.9)$$

Подставляя вместо левой части уравнения (3.5) выражение (3.9) получим зависимость, позволяющую оценить время работы генератора:

$$t_p = \frac{\ell}{u_1 \cdot \left(\frac{p_{CT}}{p_{ATM}} \right)^v}, \quad (3.10)$$

где

$$u_1 = u_a \cdot e^{\beta \cdot T_H}.$$

С учетом выражений стационарного давления, полученных для частных случаев, продолжительность работы ГОА может быть представлена следующими выражениями.

Случай 1.

$$t_p = \frac{\ell}{u_1} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{1 + \eta}}. \quad (3.11)$$

Случай 2.

$$t_p = \frac{\ell}{u_1} (1 - \eta). \quad (3.12)$$

Случай 3.

$$t_p = \frac{\ell}{u_1} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{2 \cdot \eta}{1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \eta}} \right)^3}. \quad (3.13)$$

Случай 4.

$$t_p = \frac{\ell}{u_1} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{2}{\eta + \sqrt{\eta^2 + 4}} \right)^3}. \quad (3.14)$$

Исследование влияния параметров аэрозолеобразующего заряда и корпуса генератора на время его работы проведем при следующих значениях постоянных:

$$\begin{aligned} u_a &= 0.001 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \beta = 0.001; T_H = 2200 \text{ К}; S_B = 1.178 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \\ S_3 &= 9.08 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; R = 287 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}); \rho_T = 1819 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}; \\ p_{\text{атм}} &= 101325 \text{ Па}; \mu = 0.97; \chi = 0.9; k = 1.4. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Чтобы выяснить степень влияния показателя ν на продолжительность работы генератора, подставим значения, рассчитанные по формулам (3.11) и (3.14), при постоянных (3.15) в формулу линейной интерполяции (2.67). Графическая интерпретация результатов представлена на рис. 3.8. Из анализа этого графика следует, что результаты

интерполяции, прямая 1, хорошо согласуются с истинными данными, которые обозначены кругами. Также отмечено, что увеличение показателя ν в 3.5 раза приводит к снижению времени всего лишь на 0.3 %.

Влияние параметров аэрозолеобразующего заряда на длительность работы ГОА можно установить с помощью графической зависимости на рис. 3.9. Увеличение температуры горения и плотности заряда приводит к снижению продолжительности работы ГОА. Причем изменение плотности заряда приводит к более интенсивному изменению времени работы, хотя варьирование обоих параметров приводит к незначительному его снижению.

Тот факт, что температура горения заряда слабо влияет на время работы генератора, позволяет применять топлива с низкой температурой горения. Это дает возможность, согласно выражению (2.48), снизить температуру аэрозоля внутри корпуса, а следовательно и на выходе из генератора.

Изучим влияние начальной температуры и скорости горения заряда при атмосферном давлении на время работы генератора с помощью графика, представленного на рис. 3.10.

Очевидно, что с ростом значений обоих параметров время работы уменьшается. Необходимо отметить, что при начальной температуре заряда близкой к 0°C , повышение скорости горения заряда приводит к уменьшению времени работы быстрее, чем при более высокой температуре.

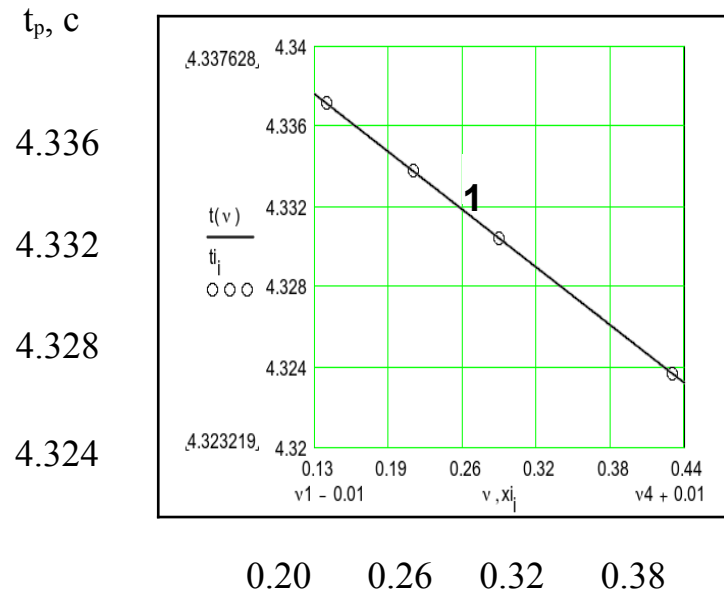


Рис. 3.8. Зависимость времени работы ГОА от значения показателя

ν

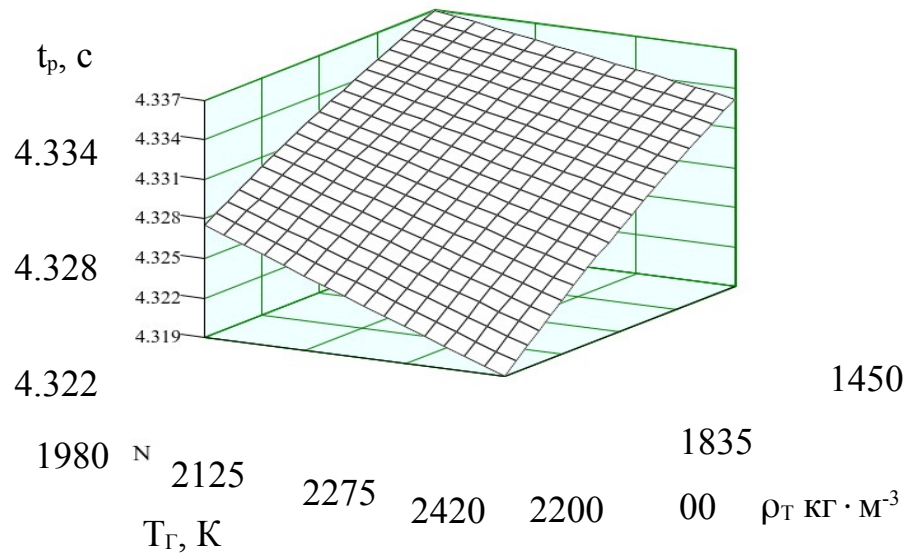


Рис 3.9. Зависимость времени работы ГОА от температуры горения и плотности заряда АОС

На рис. 3.11 представлена графическая зависимость времени работы ГОА от площади поверхности горения и площади выпускных отверстий. Варьирование указанных параметров приводит к незначительному изменению времени работы ГОА.

Причем минимальное время достигается при увеличении площади поверхности горения и уменьшении площади выпускных отверстий. Следует отметить, что отношение между исследуемыми параметрами ограничено некоторым значением, превышение которого приведет к изменению режима истечения газо-аэрозольной смеси из генератора.

Таким образом, время работы генератора определяется выражением (3.10). Анализ этого выражения показал, что время работы ГОА прямо пропорционально длине заряда, коэффициент пропорциональности принимает значения порядка 10^3 . Так же установлено, что значительное влияние на длительность работы оказывает скорость горения заряда при атмосферном давлении, начальная температура аэрозолеобразующего состава.

3.3. Исследование допустимого отношения между площадью поверхности горения заряда АОС и площадью выпускных отверстий

Проведенные исследования показали, что величина площади поверхности горения заряда АОС оказывает определенное влияние на изменение основных характеристик генератора.

Перепишем выражение (2.49) в следующем виде

$$\frac{S_3}{S_B} = \frac{\mu}{\rho_T \cdot u_a \cdot e^{\beta \cdot T_H}} \cdot \left(\frac{P_{ATM}}{P_{CT}} \right)^v \cdot \sqrt[2]{\frac{2}{\alpha} \cdot \frac{P_{CT}^2}{R \cdot T_G \cdot \gamma} \cdot \left(\frac{P_{ATM}}{P_{CT}} \right)^{\frac{2}{k}} \left(1 - \left(\frac{P_{ATM}}{P_{CT}} \right)^{\alpha} \right)}. \quad (3.16)$$

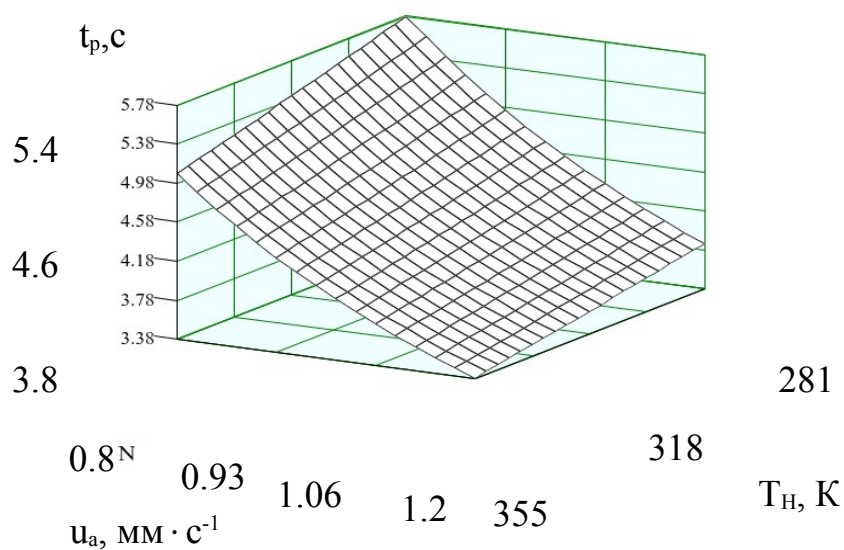


Рис. 3.10. Зависимость времени работы ГОА от начальной температуры заряда и скорости его горения u_a

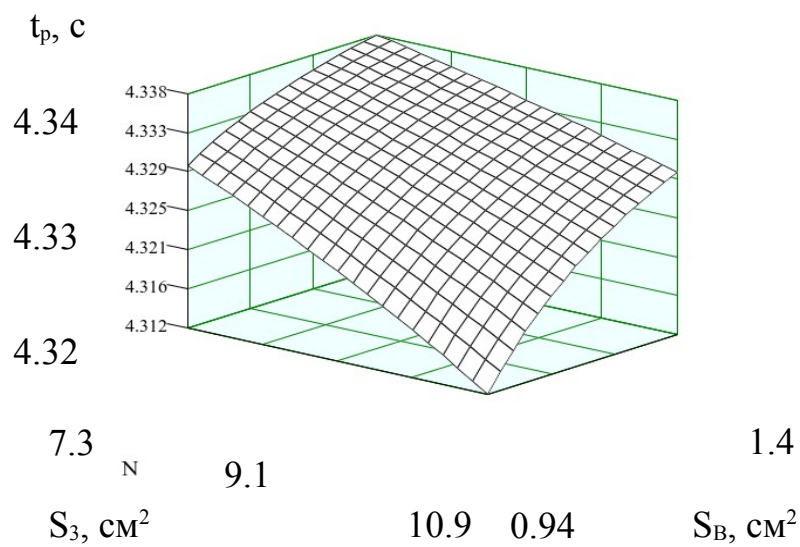


Рис. 3.11. Зависимость времени работы ГОА от площади поверхности горения и площади выпускных отверстий

Выражение (3.16) позволяет определить максимальное отношение между площадью поверхности горения и площадью выпускных отверстий. С учетом выражения (2.55) для определения стационарного давления, полученного при $\nu = 0.14$, из (3.16) получим

$$\left(\frac{S_3}{S_B}\right)^2 = \psi \cdot \left[\left(\frac{p_{CT}}{p_{ATM}}\right)^\alpha - 1 \right], \quad (3.17)$$

где

$$\psi = \left(\frac{\mu \cdot p_{ATM}}{\rho_T \cdot u_a \cdot e^{\beta \cdot T_H}} \right)^2 \cdot \frac{2}{T_\Gamma \cdot \chi \cdot R \cdot \alpha}. \quad (3.18)$$

Подставим в (3.16) частный результат (2.58), для $\nu = 0.286$, запишем:

$$\left(\frac{S_3}{S_B}\right)^2 = \psi \cdot \left[1 - \left(\frac{p_{ATM}}{p_{CT}}\right)^\alpha \right]. \quad (3.19)$$

При подстановке (2.61) в (3.16) с учетом того, что $\nu = 0.21$ имеем

$$\left(\frac{S_3}{S_B}\right)^2 = \psi \cdot \left[\left(\frac{p_{CT}}{p_{ATM}}\right)^\alpha - 1 \right] \cdot \left(\frac{p_{ATM}}{p_{CT}}\right)^{2\alpha}. \quad (3.20)$$

С учетом выражения (2.66), при $\nu = 0.43$ выражение (3.16) примет вид:

$$\left(\frac{S_3}{S_B}\right)^2 = \psi \cdot \left[\left(\frac{p_{CT}}{p_{ATM}}\right)^\alpha - 1 \right] \cdot \left(\frac{p_{ATM}}{p_{CT}}\right)^{\frac{\alpha}{2}}. \quad (3.21)$$

Принимая во внимание, что в установившемся режиме работы генератора, площадь поверхности горения больше площади выпускных

отверстий запишем выражение для определения минимального среднеобъемного давления в камере в виде

$$p_{\min} = p_{\text{атм}} \cdot \sqrt[1+\alpha]{1 + \frac{1}{\psi}}, \quad (3.22)$$

когда $\nu = 0.14$.

Подставляя в (2.58) $S_3/S_B = 1$, получим:

$$p_{\min} = p_{\text{атм}} \cdot \sqrt[1+\alpha]{\frac{\psi}{\psi - 1}}. \quad (3.23)$$

Аналогично из (2.61) будем иметь

$$p_{\min} = p_{\text{атм}} \cdot \sqrt[1+\alpha]{\frac{\psi - \sqrt{\psi^2 - 4 \cdot \psi}}{2}}. \quad (3.24)$$

При $\nu = 0.43$ будет:

$$p_{\min} = p_{\text{атм}} \cdot \sqrt[1+\alpha]{\left(\frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \psi^2}}{2 \cdot \psi} \right)^2}. \quad (3.25)$$

На рис 3.12 представлена зависимость S_3/S_B от стационарного давления, где цифрами обозначены: 1 – зависимость при $\nu = 0.14$, 2 – при $\nu = 0.286$.

Анализ графиков показал, что влияние показателя ν сказывается при избыточном давлении порядка 25 кПа, в диапазоне давлений близких к

атмосферному, графики практически совпадают. Что говорит о незначительном влиянии показателя V на исследуемую зависимость.

Анализ зависимости, представленной на рис. 3.13, показал, что увеличение плотности заряда приводит к уменьшению в 1.5 раза значения отношения площадей. Понижение температуры горения заряда способствует росту максимального значения S_3/S_B . Этот факт, позволяет использовать заряды с низкой температурой горения, при этом плотность может принимать ограниченное значение.

Анализ зависимости S_3/S_B от начальной температуры заряда и скорости горения заряда при атмосферном давлении, которая представлена на рис. 3.14, показал, что увеличение перечисленных параметров ведет к уменьшению рассматриваемого соотношения площадей. Но при этом влияние начальной температуры на исследуемое соотношение незначительно, увеличение скорости в 1.5 раза приводит к уменьшению в 1.5 раза S_3/S_B , это позволяет повышать указанные параметры лишь до определенного предела.

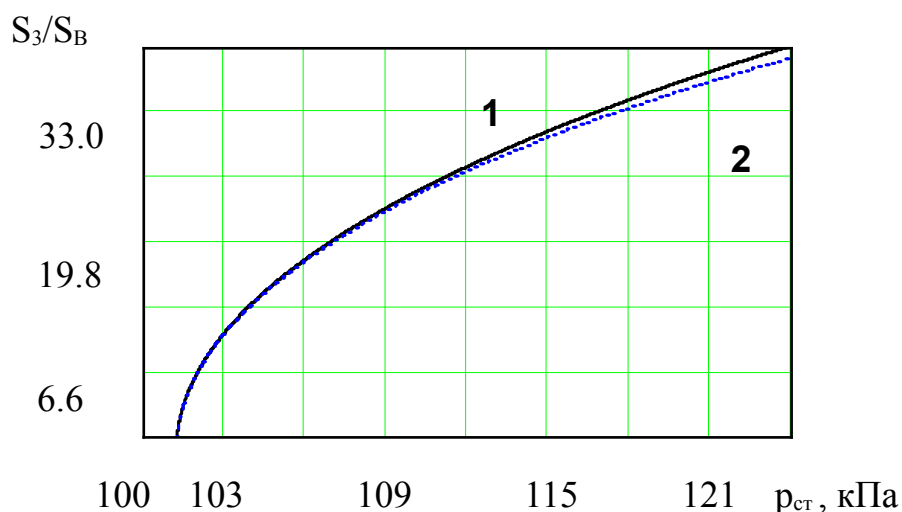


Рис. 3.12. Зависимость отношения площадей от стационарного давления

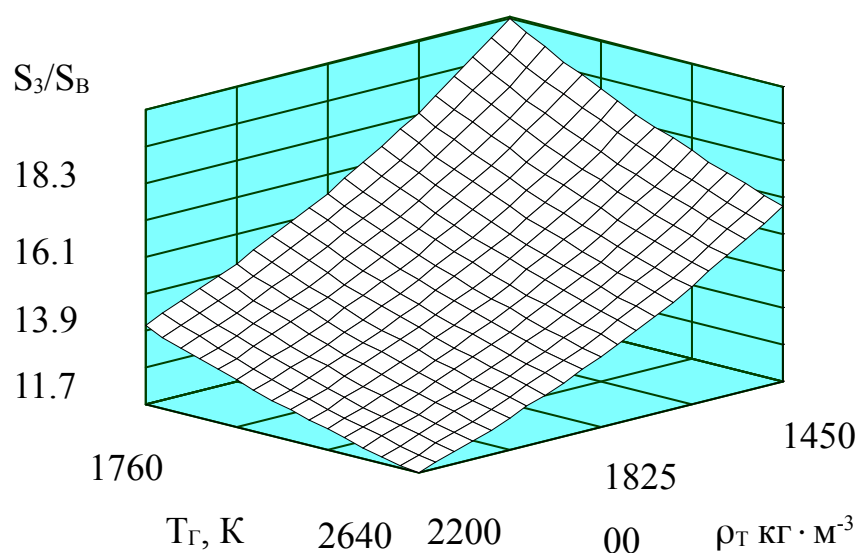


Рис. 3.13. Зависимость отношения площадей от температуры горения и плотности заряда

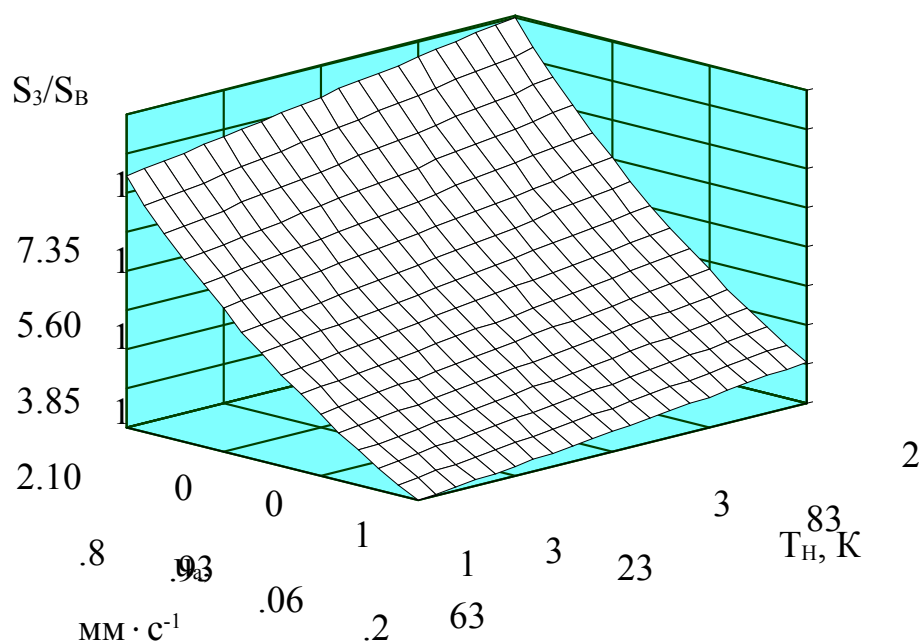


Рис. 3.14. Зависимость отношения площадей от скорости горения заряда при атмосферном давлении и его начальной температуры

Таким образом, выражения (3.17), (3.19) – (3.21) позволяют установить максимальное соотношение между площадью поверхности горения и площадью выпускных отверстий в зависимости от параметров аэрозолеобразующего заряда и корпуса генератора, а также от требуемого значения стационарного давления в корпусе ГОА. Выражения (3.22) – (3.25) устанавливают минимальное значение давления в корпусе генератора при условии $S_3/S_B = 1$. Показано, что в установившемся режиме работы ГОА наибольшее влияние на исследуемое отношение оказывают плотность аэрозолеобразующего заряда и скорость его горения при атмосферном давлении.

3.4. Оценка массы огнетушащего вещества, образующегося во время работы генератора

Запишем выражение для массы огнетушащего вещества, которое образуется на выходе генератора за время t_p , в следующем виде

$$m_{\text{АЭР}} = M_{\text{ст}} \cdot t_p. \quad (3.26)$$

Подставим в (3.26) выражения для массового расхода и времени работы ГОА, найденные в предыдущих пунктах для частных случаев. Получим выражение

$$m_{\text{АЭР}} = \rho_T \cdot S_3 \cdot \ell, \quad (3.27)$$

которое не зависит от значений показателя ν .

С учетом того, что заряд имеет форму правильного цилиндра и горение его осуществляется по торцу, произведение площади поверхности

горения S_3 на длину заряда ℓ равно объему шашки аэрозолеобразующего заряда, тогда формулу (3.27) можно переписать в виде

$$m_{\text{АЭР}} = \rho_{\text{Т}} \cdot V_{\text{ЗАР}}, \quad (3.28)$$

где $V_{\text{ЗАР}}$ – объем аэрозолеобразующего заряда, которым снабжен ГОА.

Таким образом, произведение, стоящее справа в (3.28) есть не что иное, как масса заряда аэрозолеобразующего состава. Следовательно, равенство (3.28) позволяет отождествить массу состава с массой огнетушащего аэрозоля, образуемого генератором. А так как масса аэрозолеобразующего состава, в соответствии с требованиями нормативных документов [62], является одной из основных характеристик ГОА, выражение (3.27) можно использовать при проектировании генераторов, с заданными характеристиками.

Огнетушащая способность аэрозоля, получаемого при работе ГОА, по определению [62] есть отношение массы заряда АОС в генераторе к максимальному объему условно герметичного помещения, в котором генератор обеспечивает тушение определенных модельных очагов пожара. Это позволяет записать выражение для расчета объема условно герметичного помещения в следующем виде

$$V_{\text{ПОМ}} = \frac{m_{\text{АЭР}}}{q_{\text{Н}}}, \quad (3.29)$$

где $q_{\text{Н}}$ – нормативная огнетушащая концентрация аэрозоля.

Для различных марок зарядов АОС этот параметр может принимать различные значения. Но, в соответствии с требованиями нормативных документов [62], его величина должна равняться не менее $0.05 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Анализ выражения (3.29) показал, что при фиксированной огнетушащей способности аэрозоля объем защищаемого помещения прямо

пропорционален массе образовавшегося за время работы генератора аэрозоля. А значит, согласно (3.27), зависит от плотности и длины заряда, а также площади поверхности горения.

Таким образом, доказано, что масса огнетушащего аэрозоля эквивалентна массе аэрозолеобразующего заряда генератора.

3.5. Имитационные модели характеристик ГОА

3.5.1. Имитационная модель длительности переходного процесса в камере сгорания ГОА

На основании анализа формул, определяющих длительность переходного процесса в камере сгорания генератора огнетушащего аэрозоля, аналитическое выражение, определяющее зависимость длительности переходного процесса от параметров заряда и характеристик камеры можно представить в следующем виде:

$$t_{\text{пт}} = \Phi(\rho_T, h, u_a, \psi), \quad (3.30)$$

где h – высота свободного объема над шашкой аэрозолеобразующего заряда; $\psi = S_3/S_B$ – отношение площади поверхности горения к площади выпускных отверстий.

Или в виде ограниченного полинома:

$$t_{\text{пт}} = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_{i1} \cdot x_i + \sum_{i < j} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^4 b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (3.31)$$

где $b_0, b_{i1}, b_{ij}, b_{ii}$ – выборочные коэффициенты регрессии, которые будут получены в результате численного эксперимента; $x_i, i = \overline{1,4}$ –

кодированные переменные, связанные с физическими ρ_T, h, u_a, ψ следующим образом

$$x_1 = \frac{\rho_T - \rho_0}{\delta\rho}; x_2 = \frac{h - h_0}{\delta h}; x_3 = \frac{u_a - u_0}{\delta u}; x_4 = \frac{\psi - \psi_0}{\delta\psi} \quad (3.32)$$

где ρ_0, h_0, u_0, ψ_0 – значения факторов на нулевом уровне, которые приведены в табл. В.3.1; $\delta\rho, \delta h, \delta u, \delta\psi$ – интервалы варьирования факторов, указанные в той же таблице.

Полученное эмпирическим путем выражение вида (3.31) будем называть математической моделью длительности переходного процесса.

Проведем имитационное моделирование в оболочке MathCAD 7 Pro, с помощью программы "epf-model.mcd". При этом, для нахождения коэффициентов регрессии, используем методы теории планирования эксперимента. Пусть модель (3.31) имеет вид:

$$\begin{aligned} t_{\text{ПП}} = & b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + \\ & + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + \\ & + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + \\ & + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Имитационные процедуры будем проводить согласно плану, который дает возможность предсказать значение функции отклика с дисперсией, одинаковой на равных расстояниях от центра плана, то есть центральным композиционным рототабельным планом второго порядка [40]. Реализация плана эксперимента представлена в табл. В.3.2, в виде расширенной матрицы, которая позволяет оценить коэффициенты регрессии при взаимодействиях факторов. В этой же таблице приведены результаты опытов по плану 2^4 .

Так как ядро плана имеет вид 2^4 , то согласно табличных данных [40], число опытов в центре плана n_0 равно семи, звездных точек – восемь,

с плечом d равным двум.

Число вычислительных процедур тогда должно составлять

$$N = 2^m + 2 \cdot m + n_0 = 31, \text{ при } m = 4. \quad (3.34)$$

По результатам эксперимента в ядре плана получена оценка

$$\tilde{b}_0 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{u=1}^2 t_{\text{пл } u}. \quad (3.35)$$

Среднее значение наблюдений в центре плана определим из выражения

$$\bar{t}_{\text{пл}} = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{j=1}^{n_0} t_{\text{пл ц.п. } j}. \quad (3.36)$$

Оценка дисперсии ошибок наблюдений $s_{\text{ц.п.}}^2$, которая определяется по результатам семи параллельных опытов в центре плана, равна отношению суммы квадратов невязки в центре плана и числа степеней свободы $f_{\text{ц.п.}} = n_0 - 1$ [48]

$$s_{\text{ц.п.}}^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \cdot \sum_{j=1}^{n_0} (t_{\text{пл ц.п. } j} - \bar{t}_{\text{пл}})^2. \quad (3.37)$$

Критическое значение критерия Стьюдента для числа степеней свободы $f_{\text{ц.п.}} = 6$ при уровне значимости 5% равно $t_{(0.05; 6)} = 2.45$ [40]. Проверка гипотезы о значимости квадратичных членов в модели осуществляется на основании соотношения [103]

$$|\bar{t}_{\text{III}} - \tilde{b}_0| > t_{(0.05;6)} \cdot s_{\text{II,II}}^2 \cdot \sqrt{\frac{n_0 + N}{n_0 \cdot N}}. \quad (3.38)$$

Результаты расчетов по формулам (3.35)–(3.38) приведены в табл. В.3.3.

Таким образом, наличие квадратичных эффектов в модели (3.31) полностью обосновано.

Расчет коэффициентов регрессии произведем с помощью формул

$$b_0 = \frac{A}{N} \left(2 \cdot \lambda^2 (k+2) \sum_{u=1}^N y_u - 2 \cdot \lambda \cdot C \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u \right) \quad (3.39)$$

$$b_i = \frac{C}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \quad i = \overline{1, k}; \quad (3.40)$$

$$b_{ij} = \frac{C^2}{N \cdot \lambda} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u, \quad i, j = \overline{1, k}, \quad i < j; \quad (3.41)$$

$$b_{ii} = \frac{A}{N} [C^2 ((k+2) \cdot \lambda - k) \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + C^2 (1 - \lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - 2 \cdot \lambda \cdot C \sum_{u=1}^N y_u]; \quad i = \overline{1, k}, \quad (3.42)$$

где приняты обозначения

$$C = \frac{N}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (3.43)$$

$$\lambda = \frac{k \cdot N}{(k+2) \cdot (N - n_0)}; \quad (3.44)$$

$$A = \frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot [(k+2) \cdot \lambda - k]}; \quad (3.45)$$

y_u – значение функции отклика.

Для плана с ядром вида 2^4 , будем иметь

$$b_0 = 0.142857 \cdot \sum_{u=1}^N t_{mn_u} - 0.035714 \cdot \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^k \left(x_{iu}^2 \cdot t_{mn_u} \right); \quad (3.46)$$

$$b_i = 0.041667 \cdot \sum_{u=1}^N \left(x_{iu} \cdot t_{mn_u} \right); \quad (3.47)$$

$$b_{ij} = 0.0625 \cdot \sum_{u=1}^N \left(x_{iu} x_{ju} \cdot t_{mn_u} \right); \quad (3.48)$$

$$b_{ii} = 0.03125 \cdot \sum_{u=1}^N \left(x_{iu}^2 \cdot t_{mn_u} \right) + 0.00372 \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N \left(x_{iu}^2 \cdot t_{mn_u} \right) - 0.035714 \cdot \sum_{u=1}^N t_{mn_u}. \quad (3.49)$$

Подставим в формулы (3.46) – (3.49) значение для длительности переходного процесса из табл. В.3.2, полученные в результате численного эксперимента. Рассчитанные значения оценок коэффициентов уравнения регрессии приведены в табл. В.3.4.

Адекватность модели (3.32), коэффициенты которой приведены в табл. В.3.4, проверим с помощью критерия Фишера. Так как в каждой точке плана было проведено по одному эксперименту, то ошибку опытов, согласно [48], оценим по результатам повторных экспериментов в центре плана. В соответствии с критерием Фишера должно выполняться неравенство

$$F_{АД} = \frac{s_{ад}^2}{s_{ц.п.}^2} < F_{кр} \quad (3.50)$$

где $F_{кр}$ – критическое значение критерия Фишера, определяемое по таблице приложения 3 [40], для значений степеней свободы $\varphi_{ад}$, $f_{ц.п.}$ и для уровня значимости 0.05.

В том случае, когда в каждой точке плана проводится по одному опыту, дисперсию воспроизводимости s_y^2 , в соответствии с [48], определяют по результатам n_0 параллельных опытов в центре плана. Таким образом, ошибка опыта s_y^2 совпадает с $s_{ц.п.}^2$ и определяется выражением (3.37)

Дисперсию адекватности $s_{ад}^2$ найдем с помощью следующего выражения

$$s_{ад}^2 = \frac{S_{ад}^2}{\varphi_{ад}}, \quad (3.51)$$

здесь

$$S_{ад}^2 = n_0 (\bar{y}_{ц.п.} - b_0)^2 + \sum_{u=1}^{2^k+2^k} (t_{пп\ u} - t_{пп\ M_u})^2; \quad (3.52)$$

$t_{пп\ M}$ – длительность переходного процесса в камере генератора, определенная с помощью модели (3.33), при значениях коэффициентов регрессии из табл. В.3.4.

Дисперсия адекватности имеет $\varphi_{ад} = N - k - 1$ степеней свободы, здесь k равно числу определяемых факторов модели.

Результаты расчетов по формулам (3.50) – (3.52) приведены в табл. В.3.5.

Очевидно, что условие (3.50) для модели (3.32) выполняется, следовательно, модель адекватно описывает реальные процессы.

Оценку значимости коэффициентов уравнения регрессии (3.32) проведем с помощью неравенства [15]

$$|b_i| \geq b_{кр} = t_{(0.05, 6)} \cdot s_{кр_i}. \quad (3.53)$$

В случае выполнения, которого соответствующий коэффициент b_i признается значимым.

Оценку дисперсии коэффициента b_0 определим из следующего выражения

$$s_{кр_0}^2 = \frac{2A \cdot \lambda}{N} \cdot (k+2) \cdot s_y^2. \quad (3.54)$$

Для коэффициентов $b_i, i = \overline{1, k}$, оценка дисперсии определяется выражением

$$s_{кр_1}^2 = \frac{c}{N} \cdot s_y^2. \quad (3.55)$$

Оценку дисперсии коэффициентов при взаимодействии факторов найдем из выражения

$$s_{кр_1}^2 = \frac{c^2}{N \cdot \lambda} \cdot s_y^2. \quad (3.56)$$

И, наконец, оценку для коэффициентов при квадратичных эффектах можно получить по формуле

$$s_{кр_{11}}^2 = \frac{A \cdot [(k+1) \cdot \lambda - (k+2)] \cdot c^2}{N} \cdot s_y^2. \quad (3.57)$$

Результаты проверки на значимость коэффициентов уравнения регрессии сведены в табл. В.3.6.

Таким образом, зависимость продолжительности переходного процесса в камере генератора от плотности заряда, скорости его горения,

высоты свободной части камеры и отношения площадей может быть представлена в виде следующего выражения

$$t_{\text{пп}} = 266.7 + 45.33 \cdot x_1 + 87.17 \cdot x_2 + 68.08 \cdot x_3 + 156.17 \cdot x_4 + \\ + 14.5 \cdot x_1 \cdot x_2 + 10.88 \cdot x_1 \cdot x_3 + 24.88 \cdot x_1 \cdot x_4 + 21.75 \cdot x_2 \cdot x_3 + \\ + 48.75 \cdot x_2 \cdot x_4 + 37.63 \cdot x_3 \cdot x_4 + 22.05 \cdot x_4^2 \quad (3.58)$$

Анализ модели (3.58) показал, что при нулевых значениях всех факторов, длительность переходного процесса в камере генератора равна 266.7 мкс. Увеличение значения всех факторов приводит к увеличению рассматриваемого параметра. Самое слабое влияние при этом оказывает изменение плотности заряда, наибольший вес имеет оценка при четвертом факторе, следовательно, уменьшение отношения площади поверхности горения к площади выпускных отверстий приведет к наискорейшему снижению функции выхода. Значительное влияние на исследуемую характеристику этого параметра подтверждается тем, что оценки при взаимодействии факторов выше там, где присутствует x_4 .

Исследуем полученную функцию $t_{\text{пп}} = \varphi(x_1, x_2, x_3, x_4)$ на экстремум.

С учетом того, что на модель (3.58) наложены ограничения вида

$$|x_i| \leq 2, \quad i = \overline{1,4}, \quad (3.59)$$

оптимизационную задачу будем решать с помощью обобщенного метода множителей Лагранжа. Основная идея метода опирается на следующий факт: если точка безусловного оптимума $\varphi(x_1, x_2, x_3, x_4)$ не удовлетворяет всем ограничениям (3.29) задачи, то условный оптимум должен достигаться в граничной точке области допустимых решений [98]. Соответствующая вычислительная процедура выполняется в несколько этапов. Сначала решается задача поиска оптимума функции (3.58) без

учета ограничений. Для этого найдем частные производные функции (3.58) по переменным x_1, x_2, x_3, x_4 . Имеем

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_1} = 45.33 + 14.5 \cdot x_2 + 10.88 \cdot x_3 + 24.88 \cdot x_4; \quad (3.60)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_2} = 87.17 + 14.5 \cdot x_1 + 21.75 \cdot x_3 + 48.75 \cdot x_4; \quad (3.61)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_3} = 68.08 + 10.88 \cdot x_1 + 21.75 \cdot x_2 + 37.63 \cdot x_4; \quad (3.62)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_4} = 156.17 + 24.88 \cdot x_1 + 48.75 \cdot x_2 + 37.63 \cdot x_3 + 44.1 \cdot x_4. \quad (3.63)$$

Приравняв правые части выражений (3.60) – (3.63) нулю получим систему линейных уравнений

$$\begin{cases} 14.5x_2 + 10.88x_3 + 24.88x_4 = -45.33 \\ 14.5x_1 + 21.75x_3 + 48.75x_4 = -87.17 \\ 10.88x_1 + 21.75x_2 + 37.63x_4 = -68.08 \\ 24.88x_1 + 48.75x_2 + 37.63x_3 + 44.1x_4 = -156.17 \end{cases} \quad (3.64)$$

Решая приведенную систему по формулам Крамера, относительно неизвестных x_1, x_2, x_3, x_4 получим стационарную точку с координатами $x_{1c} = -1.512$, $x_{2c} = -0.845$, $x_{3c} = -1.02$, $x_{4c} = -0.883$.

Очевидно, что координаты стационарной точки удовлетворяют ограничениям (3.59).

Чтобы определиться с видом стационарной точки составим матрицу Гессе [98], для этого продифференцируем второй раз выражения (3.60)–(3.63), в итоге имеем следующее

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 14.5 & 10.88 & 24.88 \\ 14.5 & 0 & 21.75 & 48.75 \\ 10.88 & 21.75 & 0 & 37.63 \\ 24.88 & 48.75 & 37.63 & 44.1 \end{pmatrix} \quad (3.65)$$

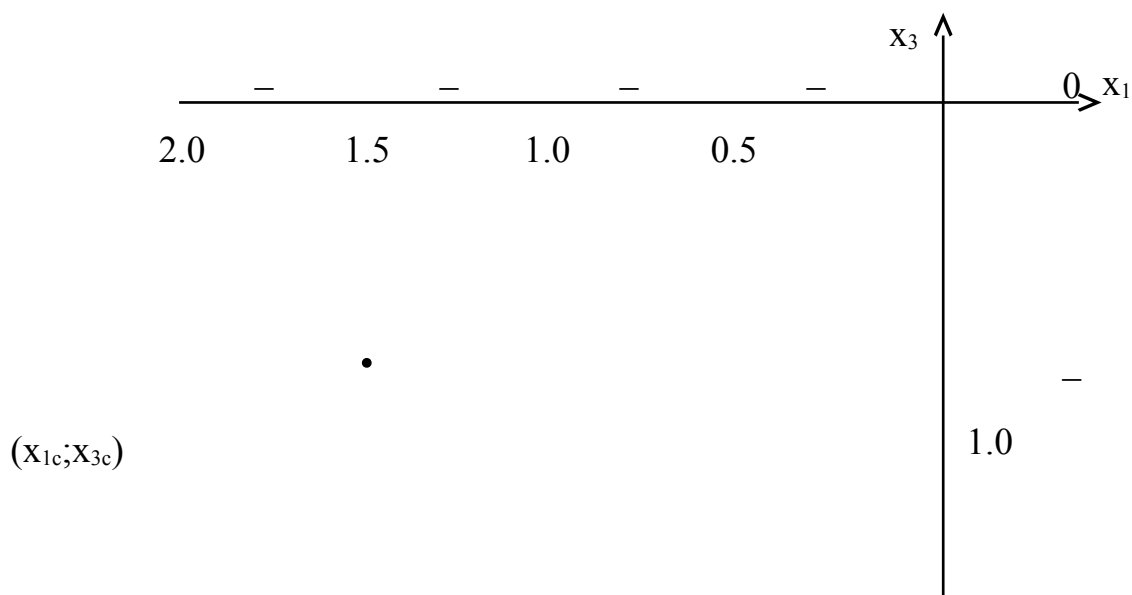
Запишем для матрицы (3.65) угловые главные миноры. Так как минор первого порядка равен нулю, матрица (3.65) ни положительно определенная, ни отрицательно определенная. Таким образом, в стационарной точке с координатами x_{1c} , x_{2c} , x_{3c} , x_{4c} экстремума нет (рис. 3.15).

Анализ контурных кривых равного выхода представленных на графике позволяет идентифицировать стационарную точку как точку типа седло, которая не является экстремальной точкой.

Для поиска минимального значения функции $\varphi(x_1, x_2, x_3, x_4)$ и координат соответствующей точки осуществим процедуру последовательного перебора. Поиск осуществлялся в диапазоне изменения кодированных переменных от -1 до $+1$, с шагом 0.005 . Результат поиска следующий: координаты точки, которой соответствует минимальное значение длительности переходного процесса в камере генератора, $x_{1min}=1.0$, $x_{2min}=-1.0$, $x_{3min}=-1.0$, $x_{4min}=-1.0$. При этом $\varphi = 80.53$.

Приведем модель (3.58) с помощью выражений (3.32) к истинным переменным

$$t_{III} = 1505 - 0.43 \cdot p_T - 19947 \cdot h - 640609 \cdot u_a - 148.85 \cdot \psi + 2.5 \cdot \psi^2 + 3.87 \cdot p_T \cdot h + 120.8 \cdot p_T \cdot u_a + 0.03 \cdot p_T \cdot \psi + 5.8 \cdot 10^6 \cdot h \cdot u_a + 1300 \cdot h \cdot \psi + 41805.6 \cdot u_a \cdot \psi. \quad (3.66)$$



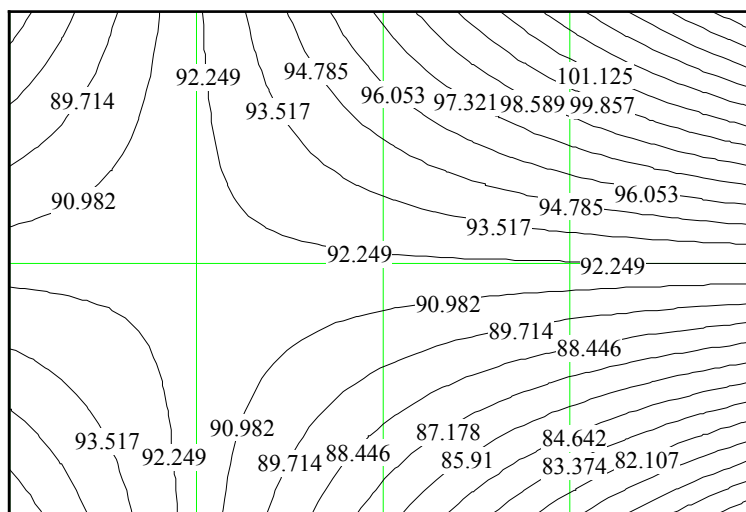


Рис. 3.15. Графическая интерпретация уравнения (3.58) при $x_2 = x_{2c}$, $x_4 = x_{4c}$

Таким образом, формула (3.66) может служить для оценки длительности переходного процесса в камере сгорания генератора огнетушащего аэрозоля.

3.5.2. Имитационная модель длительности работы ГОА

Анализ выражений (3.11)–(3.14), которые служат для оценки времени работы ГОА и получены для частных случаев, позволяет представить зависимость длительности работы генератора в следующем виде:

$$t_p = F(\rho_T, L, u_a, T_H, \psi). \quad (3.67)$$

Имитационное моделирование проведем в оболочке MathCAD 7 Pro с помощью программы "vrem_rabot.mcd", по аналитическим выражениям (3.11)–(3.14), используя значения постоянных величин, характерных для

основных модификаций аэрозолеобразующих зарядов и схем построения ГОА. При этом используем методы теории планирования эксперимента.

Представим зависимость (3.67) в виде полинома второго порядка:

$$\begin{aligned}
 t_p = & b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + \\
 & + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{55} \cdot x_5^2 + \\
 & + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{15} \cdot x_1 \cdot x_5 + \\
 & + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{25} \cdot x_2 \cdot x_5 + \\
 & + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{35} \cdot x_3 \cdot x_5 + b_{45} \cdot x_4 \cdot x_5,
 \end{aligned} \quad (3.68)$$

где x_i , $i = \overline{1,5}$ – кодированные переменные, связанные с физическими переменными $\rho_T, L, u_a, T_H, \psi$ следующим образом

$$x_1 = \frac{\rho_T - \rho_0}{\delta\rho}; x_2 = \frac{L - L_0}{\delta L}; x_3 = \frac{u_a - u_0}{\delta u}; x_4 = \frac{T_H - T_0}{\delta T}; x_5 = \frac{\psi - \psi_0}{\delta\psi} \quad (3.69)$$

здесь $\rho_0, L_0, u_0, T_0, \psi_0$ – значения факторов на нулевом уровне, которые представлены в табл. В.3.7; $\delta\rho, \delta L, \delta u, \delta T, \delta\psi$ – интервалы варьирования факторов, приведенные в той же таблице; $b_0, b_i, b_{ij}, b_{iii}$ – выборочные коэффициенты регрессии, которые будут получены в результате численного эксперимента.

Полученное эмпирическим путем уравнение будем называть математической моделью времени работы генератора.

Имитационные процедуры будем проводить в соответствии с центральным композиционным рототабельным планом второго порядка. Ядро плана представляет собой дробный факторный эксперимент типа 2^{5-1} . Составим план-матрицу эксперимента типа 2^{5-1} следующим образом: для x_1 уровни чередуются в каждом опыте, для x_2 — через два опыта, для x_3 — через четыре, для x_4 — через восемь, $x_5 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$. Расширенная матрица, которая позволяет оценить коэффициенты регрессии при взаимодействии факторов, приведена в табл. В.3.8

Число вычислительных процедур для такого плана, согласно [61], должно составлять

$$N = 2^{m \cdot p} + 2 \cdot m + n_0 = 32, \text{ при } m = 5, p = 1, n_0 = 6. \quad (3.70)$$

При этом в центре плана, согласно [40], выполнено шесть параллельных опытов, в звездных точках, которые отстоят на расстоянии две единицы от центра плана – десять опытов.

По результатам экспериментов в ядре плана 2^{5-1} (табл. В.3.8) получена оценка

$$\tilde{b}_0 = \frac{1}{2^{5-1}} \cdot \sum_{i=1}^{2^{5-1}} t_{p_i} = 61.5.$$

Среднее значение наблюдений в центре плана определяется из выражения

$$\bar{t}_{ц.п.} = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{u=1}^{n_0} t_{p_{ц.п.},u} = 60.65,$$

где $t_{p_{ц.п.},u}$ – результаты параллельных опытов в центре плана.

Дисперсию воспроизводимости определим по результатам опытов в центре плана [7]

$$s_y^2 = s_{ц.п.}^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \cdot \left(\sum_{u=1}^{n_0} (t_{p_{ц.п.},u})^2 - n_0 \cdot \bar{t}_{ц.п.}^2 \right) = 0.233. \quad (3.71)$$

Проверка гипотезы о значимости квадратичных членов в модели осуществляется на основании соотношения (3.38)

Для уровня значимости 5 %, при числе степеней свободы, равном пяти, критическое значение критерия Стьюдента составляет $t_{скр} = 2.57$.

Так как имеет место

$$|\bar{t}_{\text{ц.п.}} - \tilde{b}_0| = 0.856 > t_{\text{с кр}} \cdot s_y \cdot \sqrt{\frac{n_0 + N}{n_0 \cdot N}} = 0.55,$$

то гипотеза о статистической значимости квадратичных эффектов в модели (3.68) подтверждается.

Коэффициенты регрессии рассчитаем по формулам (3.39)–(3.42). Для плана 2^{5-1} будем иметь, согласно [40], следующие выражения

$$b_0 = 0.159091 \cdot \sum_{u=1}^N t_{p_u} - 0.034091 \cdot \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^m (x_{iu}^2 \cdot t_{p_u}); \quad (3.72)$$

$$b_i = 0.041667 \cdot \sum_{u=1}^N (x_{iu} \cdot t_{p_u}); \quad (3.73)$$

$$b_{ij} = 0.0625 \cdot \sum_{u=1}^N (x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot t_{p_u}); \quad (3.74)$$

$$b_{ii} = 0.03125 \cdot \sum_{u=1}^N (x_{iu}^2 \cdot t_{p_u}) + 0.002841 \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{u=1}^N (x_{iu}^2 \cdot t_{p_u}) - \\ - 0.034091 \cdot \sum_{u=1}^N t_{p_u}. \quad (3.75)$$

Значения оценок коэффициентов уравнения регрессии (3.68), которые рассчитаны по формулам (3.72)–(3.75), представлены в табл. В.3.9

Проверку адекватности модели (3.68), при значениях коэффициентов из табл. В.3.9, выполним на основании выражения (3.50). Дисперсия адекватности определяется выражением

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{\Phi_{\text{ад}}} \cdot \left[n_0 (\bar{t}_{\text{ц.п.}} - \tilde{t}_{p \text{ ц.п.}})^2 + \sum_{u=1}^{2^{m+2}-1} (t_{p_u} - t_{p \cdot m_u})^2 \right] = 0.665, \quad (3.76)$$

здесь $t_{p \cdot m}$ – время работы генератора, определяемое по модели (3.68), для звездных точек и ядра плана; $\tilde{t}_{p \text{ ц.п.}}$ – время работы генератора,

определяемое по модели (3.68), для центра плана.

Число степеней свободы дисперсии адекватности определяется по формуле

$$\varphi_{ад} = N - m - n_0 = 5,$$

здесь m – число определяемых коэффициентов уравнения регрессии, оно равно 21.

Дисперсия воспроизводимости, согласно [48], совпадает с ошибкой опыта и равна $s_y^2 = 0.233$. Она имеет $n_0 - 1 = 5$ степеней свободы.

Для уровня значимости 5% критическое значение критерия Фишера $F_{кр} = 5.05$, то есть выполняется следующее условие

$$F_{ад} = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} = 2.86 < F_{кр} = 5.05.$$

Следовательно, модель (3.68) является адекватной.

Оценку значимости коэффициентов уравнения регрессии (3.68) проведем с помощью неравенства

$$|b_i| > b_{кр_i} = t_{(0.05, 5)} \cdot s_{кр_i}^2, \quad (3.77)$$

здесь $t_{(0.05, 5)} = 2.57$ – критическое значение критерия Стьюдента для уровня значимости 5% и пяти степеней свободы, $s_{кр_i}^2$ – критическое значение дисперсии коэффициентов уравнения регрессии.

Дисперсии коэффициентов рассчитаем по формулам (3.54)–(3.57), найденные значения $b_{кр_i}$ представлены в табл. В.3.9.

Таким образом, модель (3.68) будет иметь вид

$$t_p = 60.64 - 0.3 \cdot x_1 + 7.6 \cdot x_2 - 9.6 \cdot x_3 - 2.48 \cdot x_4 - 0.38 \cdot x_5 + 1.38 \cdot x_3^2 - 1.18 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.35 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.34 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (3.78)$$

Анализ выражения (3.78) показал, что при нулевых значениях всех факторов, продолжительность работы генератора равна 60.64с. Увеличение длины заряда приводит к увеличению рассматриваемого параметра. Увеличение значения других факторов приводит к уменьшению времени работы. Самое слабое влияние при этом оказывает изменение плотности заряда, наибольший вес имеет оценка при третьем факторе, следовательно, увеличение скорости горения приведет к наискорейшему снижению функции выхода. Значительное влияние на исследуемую характеристику этого параметра подтверждается тем, что оценки при взаимодействии факторов выше там, где присутствует x_3 .

Для определения минимального значения функции (3.78) необходимо определить все стационарные точки, вычислить значения функции в этих точках и сравнить их со значениями функции на границе области варьирования параметров [39]. Наименьшее из этих значений и будет минимальным значением функции в исследуемой области.

Стационарные точки найдем, решив систему уравнений:



(3.79)

Так как $\frac{\partial t_p}{\partial x_1} \neq 0$ и $\frac{\partial t_p}{\partial x_5} \neq 0$ система (3.79) не имеет решения. Таким образом, оптимальное решение будем искать на границе области исследуемых параметров.

Для поиска значений координат x_i , которые обеспечивают минимум выражения (3.78) используем процедуру пошагового перебора с дискретностью 0.05 в пределах области определения переменных x_i .

Имеем следующий результат: время работы генератора в исследуемой области примет наименьшее значение $t_{p_{\min}} = 43,53 \text{ с}$, при следующих значениях координат $x_1 = 1$; $x_2 = -1$; $x_3 = 1$; $x_4 = 1$, $x_5 = 1$.

Приведем модель (3.78) с помощью выражений (3.69) к истинным переменным

$$t_p = 77.54 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 1793.1 \cdot L - 139842.1 \cdot u_a - 0.05 \cdot T_H - 0.054 \cdot \psi + \\ + 6.16 \cdot 10^7 \cdot u_a^2 - 787916.67 \cdot L \cdot u_a - 0.87 \cdot L \cdot T_H + 56.56 \cdot u_a \cdot T_H. \quad (3.80)$$

Таким образом, зависимость (3.80) может служить для определения продолжительности работы генератора огнетушащего аэрозоля по изменению плотности, начальной температуры заряда, скорости его горения, длины заряда и отношения площадей поверхности горения и выходных отверстий.

3.5.3. Имитационная модель массового расхода в установившемся режиме

С учетом аналитических выражений полученных в п. 3.1, определяющих массовый расход для частных случаев, выражение функции отклика можно представить в виде следующей зависимости:

$$M = M(\rho_T, S_3, u_a, T_H). \quad (3.81)$$

Для получения модели массового расхода применим подход, аналогичный изложенному в предыдущем параграфе. Полученное с помощью методов теории планирования эксперимента, уравнение будем называть математической моделью массового расхода через выпускные отверстия. Моделирование проведем в оболочке MathCAD 7 Pro.

Пусть модель (3.81) имеет вид:

$$M = m_0 + m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + m_3 \cdot x_3 + m_4 \cdot x_4 + m_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + m_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + m_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + m_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + m_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + m_{34} \cdot x_3 \cdot x_4, \quad (3.82)$$

где m_0, m_i, m_{ij} – выборочные коэффициенты регрессии, которые будут получены в результате численного эксперимента; $x_i, i = \overline{1,4}$ – кодированные переменные, связанные с физическими ρ_T, S_3, u_a, T_H , следующим образом

$$x_1 = \frac{\rho_T - \rho_0}{\delta\rho}; \quad x_2 = \frac{S_3 - S_0}{\delta S}; \quad x_3 = \frac{u_a - u_0}{\delta u}; \quad x_4 = \frac{T_H - T_0}{\delta T}, \quad (3.83)$$

где ρ_0, u_0, T_0, S_0 – значения факторов на нулевом уровне, представленные в табл. В.3.10; $\delta\rho, \delta S, \delta u, \delta T$ – интервалы варьирования факторов, указанные в той же таблице.

Составим план-матрицу эксперимента типа 2^4 следующим образом: для x_1 уровни чередуются в каждом опыте, для x_2 — через два опыта, для x_3 — через четыре, для x_4 — через восемь. План-матрица представлена в табл. В.3.11. Приведенный план позволяет проводить независимую оценку коэффициентов уравнения регрессии, он представляет собой расширенную матрицу, так в ней имеются столбцы, позволяющие оценить коэффициенты регрессии при взаимодействии факторов.

Число вычислительных процедур для такого плана должно составлять

$$N = 2^m = 16, \text{ при } m = 4. \quad (3.84)$$

По результатам эксперимента в ядре плана получена оценка

$$m_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N M_u = 75.86. \quad (3.85)$$

Согласно [48], чтобы оценить ошибку опыта, исходный план был дополнен n_0 параллельными вычислительными процедурами в центре плана. Среднее значение наблюдений в центре плана определим из выражения

$$\overline{M}_{ц.п.} = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{j=1}^{n_0} M_{ц.п.,j} = 75.473, \text{ при } n_0 = 7, \quad (3.86)$$

где $M_{ц.п.,j}$ – результаты повторных опытов в центре плана (табл. 3.12).

Оценка дисперсии ошибок наблюдений определяется по результатам семи параллельных опытов в центре плана, с помощью следующего выражения

$$s_y^2 = \frac{1}{6} \cdot \sum_{j=1}^7 (M_{ц.п.,j} - \overline{M}_{ц.п.})^2 = 0.256. \quad (3.87)$$

Данная оценка имеет $\varphi_{ц.п.} = n_0 - 1 = 6$ степеней свободы.

Проверка гипотезы о значимости квадратичных эффектов в модели, которая выполняется с помощью соотношения (3.38), показала, что

$$|\overline{M}_{ц.п.} - m_0| = 0.391 < t_{(0.05;6)} \cdot s_y \cdot \sqrt{\frac{n_0 + N}{n_0 \cdot N}} = 0.561.$$

Таким образом, квадратичные эффекты не являются статистически значимыми.

Коэффициенты регрессии рассчитаем по формулам

$$m_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_{i_u} \cdot M_u; \quad i = \overline{1,4} \quad (3.88)$$

$$m_{ij} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_{i_u} \cdot x_{j_u} \cdot M_u; \quad i = \overline{1,3}; \quad j = \overline{i+1,4}. \quad (3.89)$$

В результате расчетов получены следующие значения оценок

$$\begin{aligned}
m_1 &= 25.8; m_2 = 33.7; m_3 = 11.68; m_4 = 3.13; \\
m_{12} &= 11.8; m_{13} = 4.1; m_{14} = 1.1; \\
m_{23} &= 5.33; m_{24} = 1.43; m_{34} = 0.505.
\end{aligned}
\tag{3.90}$$

Оценку статистической значимости коэффициентов регрессии выполним с помощью критерия Стьюдента. Соответствующий коэффициент признается статистически значимым в случае выполнения неравенства

$$|m_i| \geq m_{кр} = t_{(0.05; 6)} \cdot s_y = 1.24; \text{ при } t_{(0.05; 6)} = 2.45, \tag{3.91}$$

здесь s_y определяется выражением (3.87), $t_{(0.05; 6)}$ – 5%-ная точка распределения Стьюдента с шестью степенями свободы.

Неравенство (3.91) выполняется для всех оценок, кроме m_{14} , m_{34} . Следовательно, модель (3.82) будет иметь вид

$$\begin{aligned}
M &= 75.86 + 25.8 \cdot x_1 + 33.7 \cdot x_2 + 11.69 \cdot x_3 + 3.13 \cdot x_4 + \\
&+ 11.68 \cdot x_1 \cdot x_2 + 4.1 \cdot x_1 \cdot x_3 + 5.33 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1.43 \cdot x_2 \cdot x_4.
\end{aligned}
\tag{3.92}$$

Дисперсия адекватности $s_{ад}$ определяется выражением

$$s_{ад}^2 = \frac{1}{\varphi_{ад}} \cdot \sum_{u=1}^N (M_u - M_{мод\ u})^2 = 0.574,$$

где $M_{мод}$ – значения массового расхода, рассчитанные по формуле (3.92); $\varphi_{ад}$ – число степеней свободы дисперсии адекватности, которое равно

$$\varphi_{ад} = N - k - 1 = 11.$$

Проверка адекватности модели (3.92) по критерию Фишера, дала положительный результат.

Проведем исследование выражения (3.92) на экстремум. Запишем частные производные по всем переменным

$$\frac{\partial M}{\partial x_1} = 25.8 + 11.68 \cdot x_2 + 4.1 \cdot x_3; \quad (3.93)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x_2} = 33.7 + 11.68 \cdot x_1 + 5.33 \cdot x_3 + 1.43 \cdot x_4; \quad (3.94)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x_3} = 11.69 + 4.1 \cdot x_1 + 5.33 \cdot x_2; \quad (3.95)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x_4} = 3.13 + 1.43 \cdot x_2. \quad (3.96)$$

Приравняв правые части полученных выражений нулю, получим систему линейных уравнений, которая после преобразования примет вид

$$\begin{cases} 11.68 \cdot x_2 + 4.1 \cdot x_3 = -25.8 \\ 11.68 \cdot x_1 + 5.33 \cdot x_3 + 1.43 \cdot x_4 = -33.7 \\ 4.1 \cdot x_1 + 5.33 \cdot x_2 = -11.69 \\ 1.43 \cdot x_2 = -3.13 \end{cases} \quad (3.97)$$

Решим полученную систему с помощью формул Крамера:

$$x_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}, \text{ где } i = \overline{1,4}. \quad (3.98)$$

Здесь $\Delta = 34.38$, $\Delta_1 = -0.198$, $\Delta_2 = -75.24$, $\Delta_3 = -1.97$, $\Delta_4 = -801.14$.

В результате расчета имеем следующие значения координат стационарной точки: $x_{1c} = -0.0058$, $x_{2c} = -2.188$, $x_{3c} = -0.057$, $x_4 = -23.31$.

Очевидно, что стационарная точка с найденными координатами находится за областью определения модели (3.92).

Для того чтобы определиться с видом стационарной точки воспользуемся графической интерпретацией уравнения (3.92) для этого построим кривые равного уровня для случая когда $x_2 = x_{2c}$, $x_4 = x_{4c}$, а x_1 , x_3 изменяются от -1 до $+1$. Результаты представлены на рис. 3.16.

Очевидно, что найденная стационарная точка является точкой типа седло и экстремума в ней функция не достигает. Следовательно, максимальное значение функции, описываемой выражением (3.92), будет достигаться на границе области определения этой модели. Для проверки этой гипотезы выполним процедуру пошагового перебора по всем четырем координатам.

По окончании расчетов получены результаты: максимальное значение массового расхода $M_{\max} = 174 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, будет достигаться при следующих значениях координат $x_1 = 1$; $x_2 = 1$; $x_3 = 1$; $x_4 = 1$.

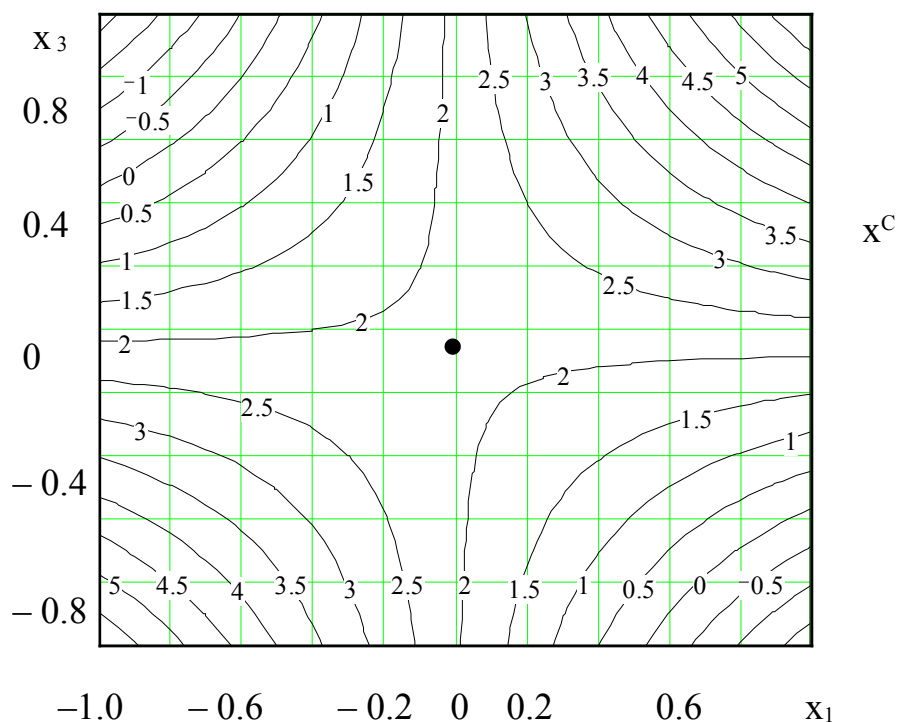


Рис. 3.16. Графическая интерпретация уравнения (3.92) при $x_2 = x_{2c}$, $x_4 = x_{4c}$

Перепишем уравнение (3.92), с учетом зависимостей (3.83), следующим образом

$$\begin{aligned}
 M = & 111.16 - 0.06 \cdot p_T - 3408.1 \cdot S_3 - 85536.9 \cdot u_a - 0.087 \cdot T_H + \\
 & + 1.42 \cdot p_T \cdot S_3 + 45.69 \cdot p_T \cdot u_a + 4.6 \cdot 10^{-5} \cdot p \cdot T_H + \\
 & + 2.58 \cdot 10^6 \cdot u_a \cdot S_3 + 2.6 \cdot S_3 \cdot T_H.
 \end{aligned} \quad (3.99)$$

Как показывает анализ выражения (3.92) наибольшее влияние на изменение массового расхода оказывается при варьировании значений плотности заряда и площади поверхности горения. Максимальное значение массового расхода можно получить, когда все параметры принимают наибольшее граничное значение.

3.6. Выводы

3.6.1. Получены аналитические выражения массового расхода газо-аэрозольной смеси для дискретных значений показателя ν .

3.6.2. Установлено, что величина массового расхода, при докритическом режиме истечения газо-аэрозольной смеси из выпускных отверстий, существенно зависит от плотности аэрозолеобразующего заряда, площади поверхности горения заряда, начальной температуры заряда и скорости его горения при атмосферном давлении.

3.6.3. Скорость горения заряда чувствительна к изменению условий внешней среды – начальной температуре заряда, а изменение характеристик самого заряда: плотности, температуры горения и показателя ν в законе горения, приводит к незначительному изменению скорости горения.

3.6.4. Получены аналитические выражения, позволяющие определить продолжительность работы генератора в зависимости от характеристик корпуса и заряда АОС. Установлено, что при увеличении площади поверхности горения и уменьшении площади выпускных отверстий время работы генератора уменьшается.

3.6.5. Показано, что в установившемся режиме работы генератора наибольшее влияние на отношение площади поверхности горения заряда к площади выпускных отверстий оказывают плотность заряда АОС и

скорость его горения при атмосферном давлении. Доказано, что масса огнетушащего аэрозоля эквивалентна массе заряда АОС генератора.

3.6.6. С использованием методов имитационного моделирования в сочетании с методами теории планирования эксперимента получены зависимости длительности переходного процесса в камере ГОА, продолжительности работы ГОА, массового расхода в установившемся режиме. Показано, что длительность переходного процесса будет минимальной, если плотность заряда будет равна $2100 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, величина свободного пространства над зарядом равна 2.75 см, скорость горения заряда равна $0.9 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$, площадь поверхности горения относится к площади выпускных отверстий как 7:1. Показано, что время работы генератора будет принимать минимальное значение при следующих значениях факторов: плотность заряда, его начальная температура и скорость горения, принимают максимальное значение из диапазона варьирования (см. табл. В.3.7), длина заряда АОС имеет наименьшую величину. Показано, что массовый расход аэрозоля в установившемся режиме работы ГОА будет максимальным и равным 174 г/с, если плотность заряда будет равна $2400 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, площадь поверхности горения – 451.6 см^2 , скорость горения при атмосферном давлении $1.15 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$, начальная температура заряда — 318 К.

РАЗДЕЛ 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГОА.
РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ГОА С
УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

4.1. Задача, методика экспериментального исследования

Основной задачей экспериментальных исследований генератора является оценка адекватности моделей, описывающей рабочие процессы в камере сгорания ГОА в установившемся и переходном режиме работы.

Основная задача состоит из решения следующих подзадач:

- исследование длительности переходного процесса в камере сгорания ГОА и подтверждения выражения (2.119);
- исследование времени подачи огнетушащего аэрозоля и подтверждение аналитических выражений (3.11) – (3.14);
- исследование скорости горения заряда АОС и подтверждение выражения (2.8).

Исследования проводятся при фиксированных значениях температуры эксплуатации ГОА из диапазона $T_H = \{(-50) \div (+50) ^\circ\text{C}\}$.

Опыты проводятся с использованием генераторов, основные параметры которых приведены в табл. Г.4.1.

Исследовательские задачи решаются с помощью экспериментальной установки, структурная схема которой представлена на рис. 4.1.

В состав экспериментальной установки входит генератор огнетушащего аэрозоля 1 с зарядом аэрозолеобразующего состава 2. В корпусе генератора 1, перпендикулярно к его продольной оси, выполнено восемь отверстий, при этом отверстие №1 расположено напротив фронтального торца заряда 2, отверстие №8 — напротив тыльного торца

шашки 2 АОС, отверстия №2 – №7 расположены через равные промежутки L_i между отверстиями №1 и №8.

В крышку корпуса генератора 1 с помощью резьбового соединения установлен узел запуска 3, который обеспечивает формирование высокотемпературных газов и подачу их на фронтальную поверхность заряда 2. Инициирование узла 3 происходит от импульса тока, формируемого устройством 5 при активации коммутатора 14. Перед срезом выпускного отверстия узла 3 установлена легкоплавкая вставка 4, в виде алюминиевой фольги толщиной 0.003 мм и шириной 5 мм.

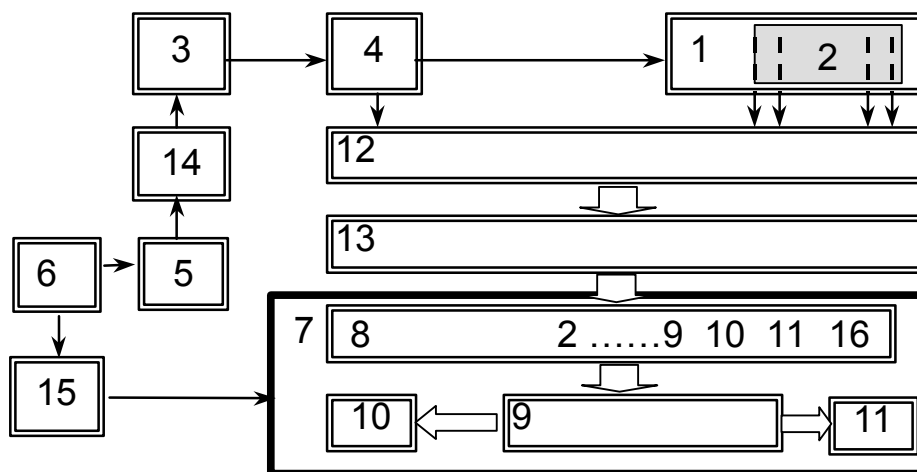


Рис. 4.1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – исследуемый генератор огнетушащего аэрозоля; 2 – заряд АОС; 3 – устройство электрического запуска ГОА; 4 – легкоплавкая вставка; 5 – устройство формирования импульса тока; 6 – блок питания; 7 – Информационно-измерительный комплекс; 8 – порт LPT1; 9 – арифметическое логическое устройство; 10 – устройство для архивирования результатов измерений; 11 – устройство отображения информации (монитор); 12 – блок легкоплавких вставок; 13 – согласующее устройство; 14, 15 – коммутатор

Основным измерительным устройством данной экспериментальной

установки является информационно-измерительный комплекс 7 на базе IBM-совместимого персонального компьютера. Порт LPT1 предназначен для приема и оцифровки измеряемой информации. Арифметическое-логическое устройство 9 осуществляет обработку информации в цифровом виде и производит расчет скорости горения заряда АОС. На жестком диске 10 осуществляется хранение результатов исследования в виде ANSI-файла. Для оперативного вывода результатов измерений в виде временных диаграмм используется монитор 11. Блок легкоплавких вставок 12, предназначен для обеспечения надежного крепления вставок №1–8 в соответствующих отверстиях генератора 1. Устройство согласования 13 необходимо для обеспечения контроля исходного состояния вставок блока 12 и организации связи с информационно-измерительным комплексом 7.

Проведение экспериментальных исследований по решению всех трех задач предусматривает выполнение подготовительного этапа, который заключается в выполнении следующих действий.

При измерении габаритов исследуемого экземпляра ГОА операции проводятся стандартным инструментом с погрешностью измерения не более 2 %. Выполняется три параллельных измерения каждого размера для одного ГОА. За результат измерений принимается среднее арифметическое значение.

Плотность заряда АОС 2 определяется косвенным путем. Исходя из известного соотношения (3.28).

Масса заряда АОС 2 в снаряженном генераторе определяется взвешиванием на весах с погрешностью, не превышающей 2 %. Для этого ГОА разбирается и взвешивается находящийся в нем АОС. За результат определения принимается среднее арифметическое трех параллельных взвешиваний для одного заряда генератора.

В корпусе исследуемого экземпляра ГОА просверливаются 8 отверстий диаметром 1 мм, с погрешностью не более 2 %. В них закладываются отрезки одножильного медного провода диаметром не

более 0.1 мм. После чего отверстия заделываются цементным раствором. Выводы подключаются к блоку легкоплавких вставок 12.

Нагрев заряда АОС осуществляют в камере теплоты. В ней устанавливают требуемую положительную температуру эксплуатации ГОА с точностью ± 2 °С. Генератор помещается в камеру теплоты, и выдерживают в ней при данной температуре в течение времени, необходимого для нагрева ГОА до установленной температуры. Затем генератор извлекается из камеры, причем время от момента извлечения ГОА из камеры теплоты до начала эксперимента не должно превышать 1,5 % времени термостатирования генератора в камере. Исследования генератора при отрицательных температурах эксплуатации проводится после его термостатирования в камере холода, по методике аналогичной при термостатировании до положительной температуры.

Далее, выводы блока вставок 12 проверяют на целостность контактов. Для этого поочередно к каждой паре контактов подключают измерительный прибор типа Ц 4341 и проводят измерение сопротивления цепи контактов.

Генератор 1, снабженный узлом запуска 2, закрепляют на стапеле (на высоте не менее 1 м в горизонтальном положении), расположенном на открытом пространстве, в защищенном от ветра месте.

Согласующее устройство 13 подключают к измерительно-вычислительному комплексу 7.

Экранированным проводом марки КОПЭЭВ производят подключение блока 12, к согласующему устройству 13.

Инициирование коммутатора 15 приводит к подаче питания на ПК 9, при этом производится запуск исполняемого файла `lpt.exe` из пакета прикладных программ "Виртуальный измерительный комплекс". На мониторе 11 появляется надпись: "Измерительный комплекс готов к работе". В диалоговом режиме производится ввод исходных данных, необходимых при проведении эксперимента: температуры генератора 1,

количества задействованных легкоплавких вставок i , расстояние L_i между ними.

Методика решения первой подзадачи заключается в следующем. Инициирование коммутатора 14 приводит к подаче импульса тока от источника 5 на устройство запуска генератора 3. Выходящие из узла запуска горячие газы расплавляют легкоплавкую вставку 4. Это служит сигналом для включения в работу "Виртуального измерительного комплекса", этот момент времени считаем нулевым. При воспламенении заряда АОС сгорает провод контакта №1, этот момент времени с точностью 10 мкс фиксируется на экране монитора 11 и записывается в ANSI-файл на устройстве архивирования 10. Измеренное время и есть длительность переходного процесса.

Далее продолжается решение второй подзадачи. Горящий заряд 2 приводит к разрыву контактов №2 – 7, что также фиксируется измерительным комплексом. Перегорание контакта №8 служит признаком окончательного выгорания заряда. Момент времени между обрывом контакта №1 и контакта №8 равен времени подачи огнетушащего аэрозоля. Все временные интервалы выводятся на монитор 11 и фиксируются устройством архивирования 10.

Третья подзадача решается параллельно с определением времени подачи огнетушащего аэрозоля из генератора. Арифметическое логическое устройство 9 производит расчет скорости горения заряда АОС 2 как отношение введенных значений расстояний L_i между плавкими вставками №1 – №8 к измеренным значениям временных промежутков между моментами, когда сгорают эти вставки.

4.2. Результаты экспериментальных исследований

В соответствии с приведенной выше методикой сначала решается первая подзадача. Исследование проводится на базе генератора марки СОТ–1У. Перед началом эксперимента генератор термостатируется в камере теплоты (холода) до фиксированного значения температуры из диапазона $T_H = \{(-50) \div (+50) ^\circ\text{C}\}$. Верхняя граница диапазона температуры T_{H_i} соответствует предельной положительной температуре эксплуатации, нижняя граница – предельной отрицательной температуре. С одной модификацией генераторов проводится m измерений длительности переходного процесса $t_{\Pi\Pi_{i,j}}$ при каждом значении T_{H_i} . По результатам экспериментов определяется математическое ожидание $\bar{t}_{\Pi\Pi_{im}}$ и дисперсия $\sigma_{\Pi\Pi_{im}}^2$

$$\bar{t}_{\Pi\Pi_{im}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m t_{\Pi\Pi_{i,j}}; \quad \sigma_{\Pi\Pi_{im}}^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{j=1}^m (t_{\Pi\Pi_{i,j}} - \bar{t}_{\Pi\Pi_{im}})^2; \quad i = \overline{1,5},$$

где i – число значений температуры эксплуатации генератора T_{H_i} .

Затем процедура повторяется для генераторов марки АГС–2.

Вторая подзадача по определению времени работы решается последовательно после решения первой подзадачи. Потому условия по ее решению остаются неизменными. Математическое ожидание и дисперсия определяется по результатам m опытов с каждой модификацией генераторов (табл. Г.4.1) для пяти значений начальной температуры заряда:

$$\bar{t}_{P_{im}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m t_{P_{i,j}}; \quad \sigma_{P_{im}}^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{j=1}^m (t_{P_{i,j}} - \bar{t}_{P_{im}})^2; \quad i = \overline{1,5}.$$

Третья подзадача, по определению скорости горения заряда АОС, решается параллельно со второй при тех же условиях проведения

эксперимента. Математическое ожидание $\bar{u}_{i,m}$ и дисперсия $\sigma_{u_{i,m}}$ определяются выражениями

$$\bar{u}_{i,m} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m u_{i,j}; \quad \sigma_{u_{i,m}}^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{j=1}^m (u_{i,j} - \bar{u}_{i,j})^2; \quad i = \overline{1,5}.$$

Результаты экспериментов по решению первой подзадачи представлены в табл. Г.4.2. – Г.4.3.

Зависимость длительности переходного процесса при воспламенении заряда АОС генераторов марки СОТ-1У и АГС–2 от его начальной температуры, полученная экспериментальным путем, представлена на рис. 4.2. Анализ полученных зависимостей показал, что длительность переходного процесса в камере сгорания ГОА будет уменьшаться с ростом начальной температуры заряда АОС. Для генератора марки СОТ-1 рассматриваемая характеристика изменится на 9 %, а для АГС-2 на 8 %. В целом, длительность переходного процесса в камере генераторов обеих марок составляет $5 \div 7$ мс и отличается от значений полученных аналитическим путем с использованием выражения (2.119) не более чем на 12 %.

Анализ зависимости среднеквадратичного отклонения при определении длительности переходного процесса от температуры (рис. 4.3) показал, что с ростом начальной температуры заряда АОС ошибка опыта уменьшается.

Результаты решения второй подзадачи представлены в табл. Г.4.4 – Г.4.5.

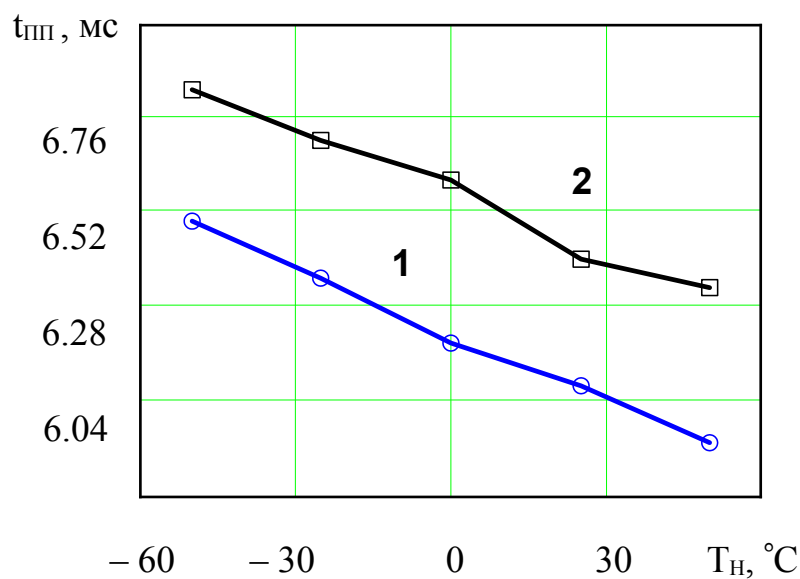


Рис. 4.2. Зависимость длительности переходного процесса от начальной температуры заряда АОС генератора : 1 – для генератора марки COT-1; 2 – для генератора марки АГС-2

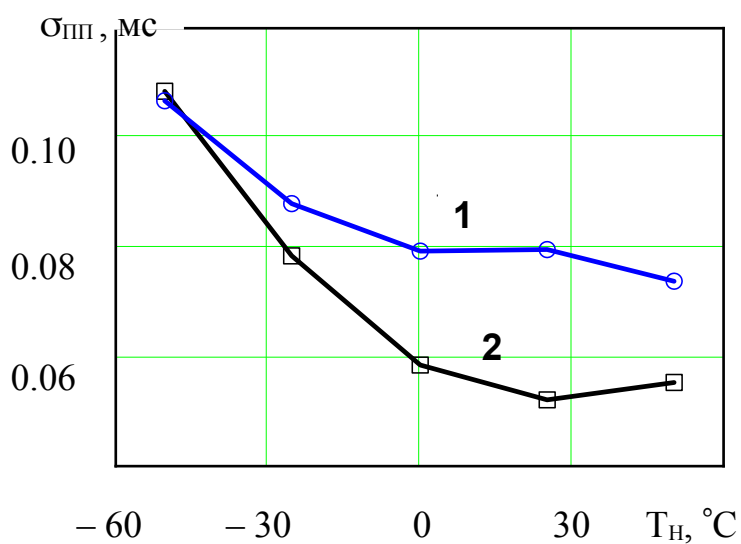


Рис. 4.3. Зависимость ошибки опыта при определении длительности переходного процесса в камере генератора от начальной температуры заряда АОС: 1 – для генератора марки COT-1Y; 2 – для генератора марки АГС-2

Зависимость времени работы генераторов марки СОТ-1У и АГС-2 от начальной температуры заряда, полученная экспериментальным путем, представлена на рис. 4.4. Очевидно, что с ростом температуры время работы генераторов уменьшается, при этом характер зависимости близок к линейному закону. При варьировании температуры в указанных выше пределах время работы генератора марки СОТ-1У изменяется не более чем на 20 секунд, а генератора АГС-2 не более чем на 12 секунд, что составляет порядка 25 % от общего времени работы этих генераторов. Данный факт объясняется тем, что в обоих генераторах используется заряд одной рецептуры, площадь поверхности горения постоянна, отличаются генераторы лишь длиной шашки аэрозолеобразующего заряда.

Сравним результаты определения времени работы генератора, полученные экспериментальным путем, с результатами, которые можно получить с помощью выражения (3.14).

В генераторах марки СОТ-1У и АГС-2 установлен аэрозолеобразующий заряд марки Е-1, который имеет следующие характеристики

$$T_{\Gamma} = 1250 \pm 100^{\circ}\text{C}; u_a = (1.0 \pm 0.05) \text{ мм/с}; \nu = 0.43; \rho_{\Gamma} = 1850 \pm 50 \text{ кг/м}^3$$

Геометрические размеры генератора СОТ-1У следующие:

$$\ell = 11.9 \text{ см}; S_3 = 132.73 \text{ см}^2; S_B = 10.62 \text{ см}^2.$$

Результаты определения времени работы генераторов при различных температурах, рассчитанные по формуле (3.14), представлены в табл. Г.4.6.

Сравнивая полученный результат с экспериментальными данными (см. табл. Г.4.4 – Г.4.5), можно отметить, что погрешность несовпадения составляет не более 15 %. Причем расчетные значения наиболее близки к экспериментальным результатам при отрицательных температурах.

На рис. 4.5 представлена зависимость среднеквадратического отклонения при определении времени работы от начальной температуры заряда.

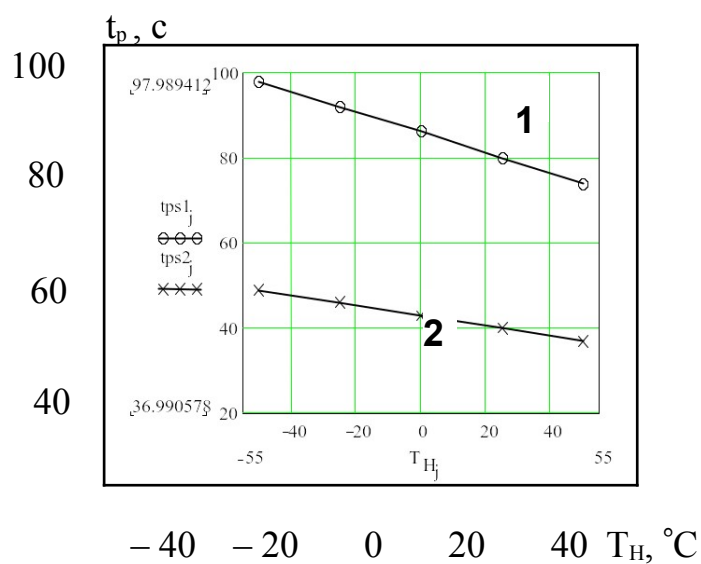


Рис. 4.4. Зависимость времени работы генераторов от начальной температуры заряда: 1 – для генератора марки COT–1Y; 2 – для генератора марки АГС–2

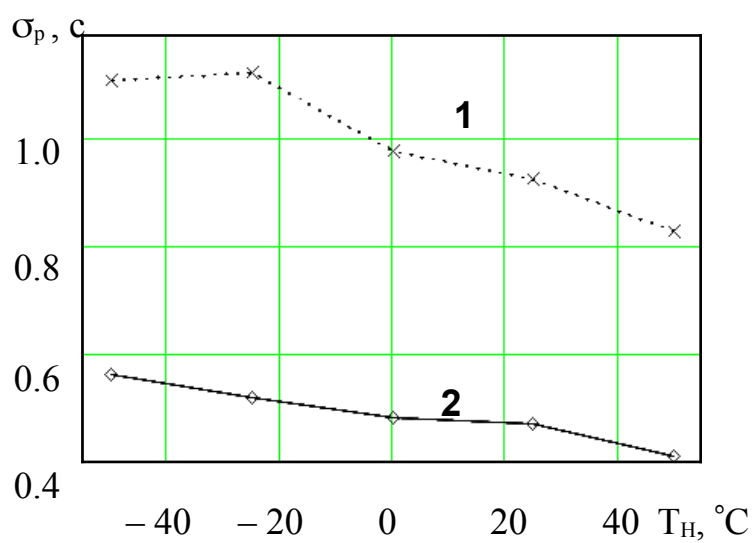


Рис. 4.5. Зависимость ошибки опыта при определении времени работы генератора от начальной температуры заряда: 1 – для генератора марки COT–1Y; 2 – для генератора марки АГС–2

Анализ представленной зависимости показал, что с ростом начальной температуры заряда генератора ошибка опыта уменьшается.

Результаты решения третьей подзадачи представлены в табл. Г.4.7 – Г.4.8

На рис. 4.6 представлены графические зависимости скорости горения заряда от его начальной температуры, полученные экспериментальным путем.

Для генераторов обеих марок характерно, что с ростом начальной температуры заряда скорость его горения возрастает, прирост скорости составляет порядка 25 %. Зависимости скорости горения для генераторов СОТ–У и АГС–2 практически совпадают, это объясняется тем, что оба генератора содержат заряд с одинаковыми характеристиками и горение осуществляется по поверхности с постоянной площадью.

Как показал анализ (рис. 4.7) с ростом начальной температуры заряда среднеквадратическое отклонение σ_U тоже возрастает. Этот факт имеет следующее обоснование, определение скорости горения заряда осуществляется путем измерения времени работы и деления длины заряда на полученное значение времени. Так как, скорость и время связаны обратной зависимостью, то и ошибки при определении этих величин будут находится в такой же зависимости.

4.3. Рекомендации по выбору схемы построения ГОА с минимальным временем работы при заданном массовом расходе

На сегодняшний день при создании новых модификаций генераторов огнетушащего аэрозоля используются экспериментальные методы, то есть совершенствование тактико-технических характеристик ГОА осуществляется путем проведения ряда испытаний.

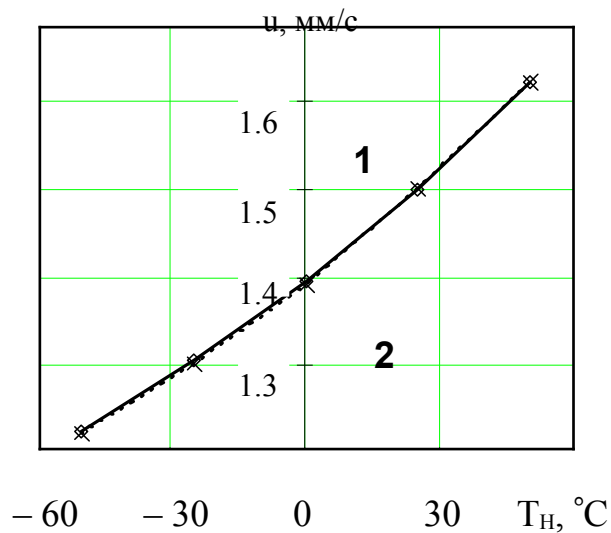


Рис. 4.6. Зависимость скорости горения заряда от его начальной температуры: 1 – для генератора марки COT-1Y; 2 – для генератора марки АГС-2

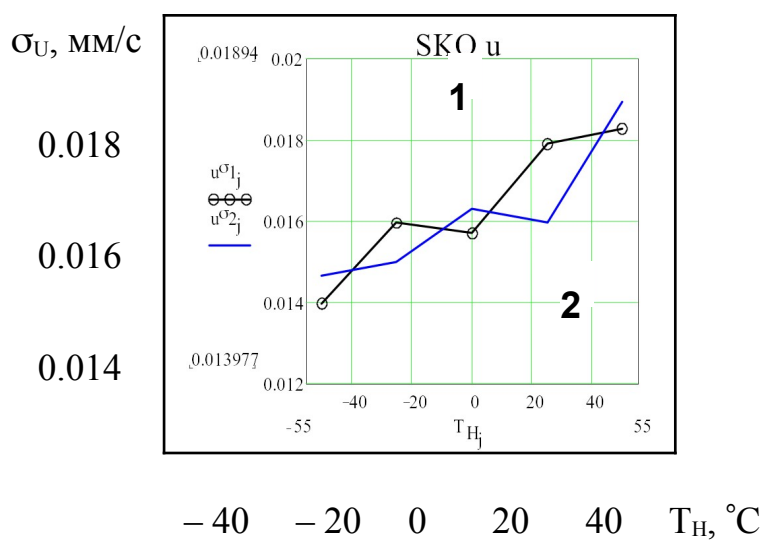


Рис. 4.7. Зависимость СКО σ_u от начальной температуры заряда: 1 – для генератора марки COT-1Y; 2 – для генератора марки АГС-2

Среди многих параметров характеризующих показатели эффективности генератора основным является огнетушащая способность, образующегося во время работы ГОА, аэрозоля. В ряде случаев она значительно зависит от длительности подачи аэрозоля, массового расхода АОС, закона изменения его в течение всего времени подачи аэрозоля, а также в некоторой степени и от длительности переходного процесса в камере сгорания ГОА.

Длительность подачи огнетушащего аэрозоля определяется временем работы каждой конкретной модификации ГОА и может изменяться в пределах от 5 с до 200 с [5]. Очевидно, что при проектировании автоматической установки аэрозольного пожаротушения, целесообразно использовать ГОА с минимальным временем работы, но при этом масса заряда должна быть такой, чтобы обеспечить нужную огнетушащую концентрацию вещества в защищаемом объеме.

Как показали исследования, время работы ГОА в значительной степени зависит от скорости горения заряда АОС, толщины сгоревшего слоя, начальной температуры заряда.

Линейная скорость горения АОС величина, которая хоть и подвержена влиянию таких факторов как плотность, начальная температура заряда, но все же в незначительной степени. Для каждой конкретной модификации АОС она принимает ограниченные значения.

Температура заряда, параметр, который зависит от условий эксплуатации генератора. В ходе эксперимента было установлено, что повышение начальной температуры заряда приводит к увеличению скорости горения и соответственно к снижению времени работы ГОА. Но использовать начальную температуру в качестве управляющего воздействия практически невозможно. Таким образом, эффективно влиять на изменение времени работы ГОА, можно варьируя только толщиной сгоревшего слоя заряда АОС.

Массовый расход огнетушащего вещества в установившемся режиме работы ГОА определяется выражениями (3.1) – (3.4). Проведенные исследования показали, что величина массового расхода может изменяться в широких пределах в зависимости от изменения площади поверхности горения, плотности и скорости горения заряда, начальной его температуры, но плотность, как и скорость горения заряда являются фиксированными параметрами АОС и принимают ограниченное значение. В значительной степени повлиять на величину массового расхода, можно изменяя площадь поверхности горения.

При проектировании установок аэрозольного тушения, в расчетах при прогнозировании параметров генераторов, лучше всего поддается моделированию режим подачи аэрозоля с постоянными во времени расходными характеристиками. Как правило, этот режим обеспечивается за счет постоянной площади поверхности горения.

Ниже рассмотрим варианты схемных решений, которые обеспечивают неизменную во времени площадь поверхности горения.

Вариант 1. Анализ существующих конструкций ГОА [67, 72, 74, 79] показал, что значительная часть существующих генераторов имеет конструкцию, которая в обобщенном виде представлена на рис. 2.1. Процесс горение в таком генераторе осуществляется по торцу заряда, то есть реализуется нейтральный закон подачи огнетушащего вещества. Время работы, при такой конструкции генератора, определяется выражением (3.10) и в основном зависит от длины шашки заряда ℓ . При этом площадь поверхности горения не изменяется со временем и определяется как площадь круга диаметра $d_{\text{зар}}$. Сократить время работы генератора, при заданных характеристиках заряда АОС, можно только сокращая величину сгоревшего слоя заряда. Чтобы при этом, не ухудшить интенсивность подачи огнетушащего аэрозоля, то есть сохранить неизменной массу заряда АОС, необходимо увеличить диаметр

цилиндрического заряда. Это в свою очередь приведет к увеличению площади поверхности горения, а значит и величины массового расхода.

Для заряда, имеющего форму правильного цилиндра, при условии, что масса заряда $m_{\text{АОС}}$ известная величина, которая определяет огнетушащую эффективность ГОА, связь между длиной заряда ℓ и его диаметром $d_{\text{зар}}$ определяется выражением:

$$d_{\text{зар}} = \sqrt{\frac{4 \cdot m_{\text{АОС}}}{\pi \cdot \ell \cdot \rho_{\text{T}}}}, \quad (4.1)$$

где ρ_{T} – плотность заряда.

Расчет по формуле (3.14) показал, что для генератора марки АГС-2, который имеет следующие характеристики [5]

$$\ell = 14 \text{ см}, d_{\text{зар}} = 13 \text{ см}, m_{\text{АОС}} = 3.25 \text{ кг},$$

уменьшение длины заряда АОС до 10 см приводит к сокращению времени работы ГОА на 25 секунд. При этом за счет увеличения диаметра заряда на 14 % увеличивается массовый расход до 40 г/с. График на рис. 4.8 иллюстрирует зависимость времени работы ГОА от начальной температуры заряда, для вариантов конструкции генератора с различной длиной и диаметром шашки заряда. Очевидно, уменьшая длину шашки, можно сократить время работы ГОА до некоторого минимального значения, при этом массовый расход будет увеличиваться.

Техническая реализация рассмотренного предложения предусматривает выполнение следующих условий:

- в составе генератора необходимо предусмотреть несколько иницирующих устройств, обеспечивающих одновременный поджиг всей поверхности горения заряда;

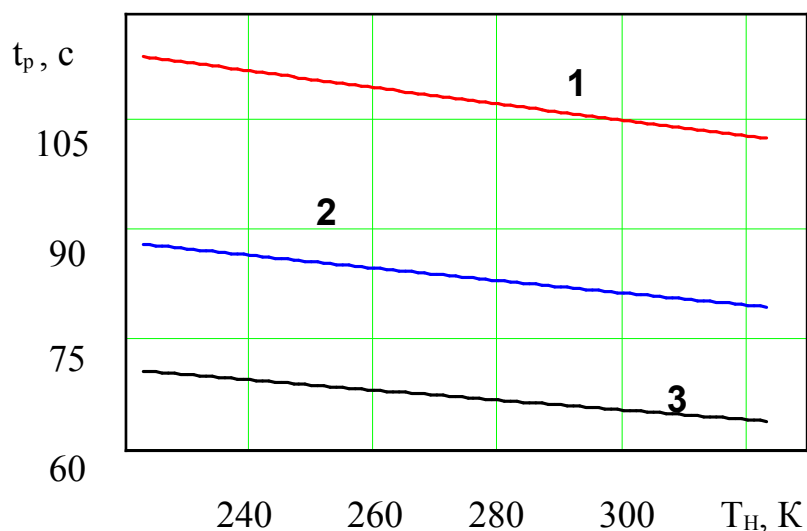


Рис. 4.8. Зависимость времени работы генератора от начальной температуры заряда: 1 – для АГС–2 при $d_{зар} = 14$ см, $L = 13$ см; 2 – при $d_{зар} = 16$ см, $L = 10$ см; 3 – при $d_{зар} = 17.9$ см, $L = 8$ см

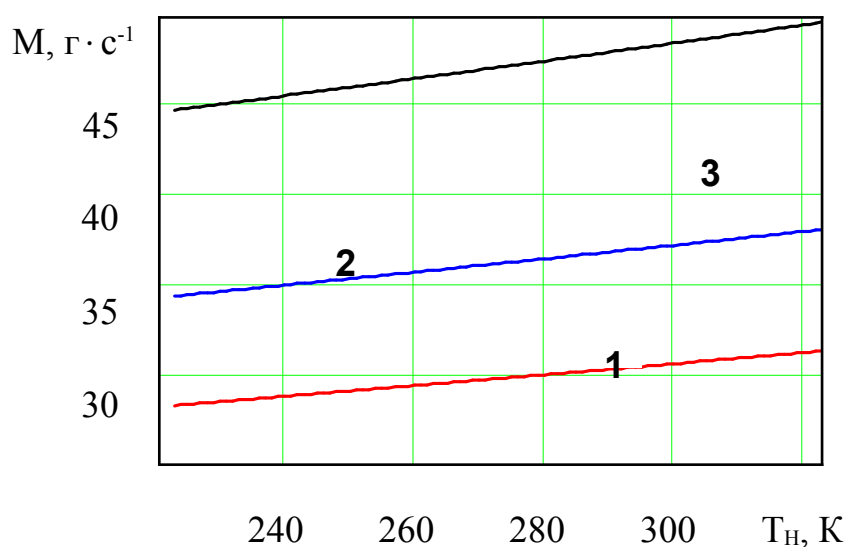


Рис. 4.9. Зависимость массового расхода от начальной температуры заряда: 1 – для АГС–2 при $d_{зар} = 14$ см, $L = 13$ см; 2 – при $d_{зар} = 16$ см, $L = 10$ см; 3 – при $d_{зар} = 17.9$ см, $L = 8$ см

- конструкция ГОА должна обеспечивать сохранение механической прочности заряда при транспортировке, монтаже и эксплуатации;
- в составе ГОА должны быть устройства, которые бы обеспечивали надежную термоизоляцию стенок корпуса, соприкасающихся с высокотемпературными продуктами сгорания АОС.

Например, для защиты условно-герметичного объекта объемом 2 м^3 , согласно [62], при условии создания в нем огнетушащей концентрации $q_H = 50 \text{ г/м}^3$ необходимо сжечь заряд массой 100 г . В качестве заряда используем состав Е–1, который имеет плотность 1600 кг/м^3 [5]. Пусть необходимо обеспечить время работы генератора до 7 с . Из выражения (3.14) находим длину цилиндрической шашки $\ell = 7,6 \text{ см}$. Подставив полученное значение в выражение (4.1), найдем диаметр заряда, который равен 10 см . За указанное время работы, согласно выражению (3.4), такой генератор обеспечит подачу огнетушащего аэрозоля с массовым расходом $M = 14,3 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$.

Таким образом, применить данные рекомендаций можно при проектировании генераторов с массой заряда АОС до 200 г , которые служат для защиты объектов с объемом до $2 \div 5 \text{ м}^3$.

Вариант 2. Заряд АОС имеет форму полого правильного цилиндра с диаметром d_H , диаметр канала d_B (рис.4.10). Торцы заряда забронированы. Горение осуществляется по наружной и внутренней поверхности заряда АОС. С учетом того, что фронт горения в каждый последующий момент времени занимает положение, эквидистантное предыдущему, толщина сгоревшего слоя h будет определяться следующим выражением:

$$h = \frac{d_H - d_B}{4}.$$

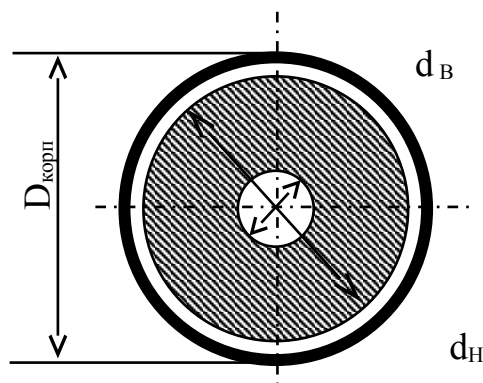


Рис. 4.10. Вариант компоновки заряда АОС с внутренним каналом.

Если принять d_H равным $0.95 \cdot d_{3AP}$, где d_{3AP} – диаметр заряда генератора АГС–2, равный 14 см, а $d_B = 0.05 \cdot d_{3AP}$, то время работы генератора с новым зарядом, согласно выражению (3.14), будет принимать значение $t_p = 25.53$ с при $T_H = 223$ К и $t_p = 25.15$ с при $T_H = 323$ К. Анализ графиков на рис. 4.11, так же показал, что при сохранении тенденции к уменьшению времени работы с ростом начальной температуры заряда, для предлагаемого варианта эта зависимость имеет слабовыраженный характер. Таким образом, заряды, которые быстрее сгорают, в меньшей степени подвержены влиянию внешней среды и сохраняют стабильность своих характеристик при изменении температуры окружающего воздуха.

Площадь поверхности горения для канального заряда будет оставаться постоянной в течение всего времени работы ГОА. При этом она будет определяться следующим выражением:

$$S_3 = \pi \cdot \ell \cdot (d_H + d_B),$$

где ℓ – длина шашки.

Зависимость массового расхода от начальной температуры заряда, представлена на рис. 4.12, цифрой 1 обозначен график зависимости для генератора АГС-2, а 2 – предлагаемый вариант. Очевидно, что увеличение

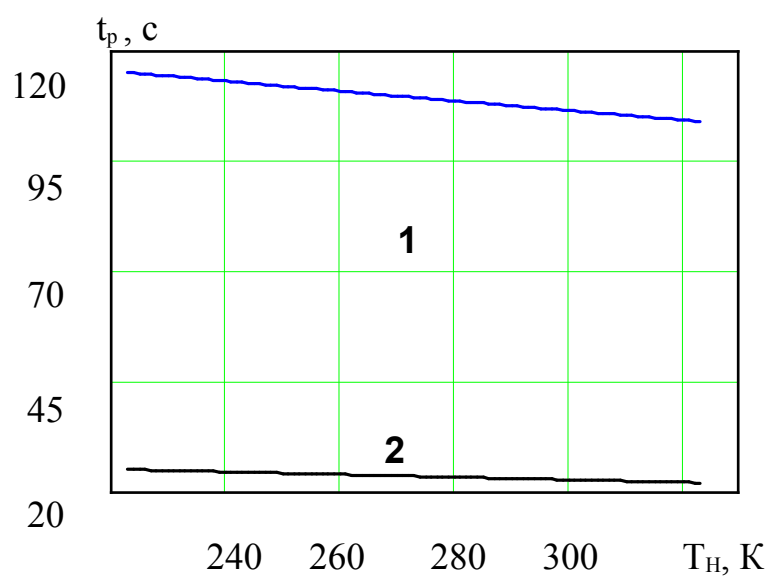


Рис. 4.11. Зависимость времени работы генератора от начальной температуры заряда 1 – для АГС–2 при $d_{зар} = 14$ см, $L = 13$ см; 2 – при $h = 3.2$ см, $\ell = 13.6$ см

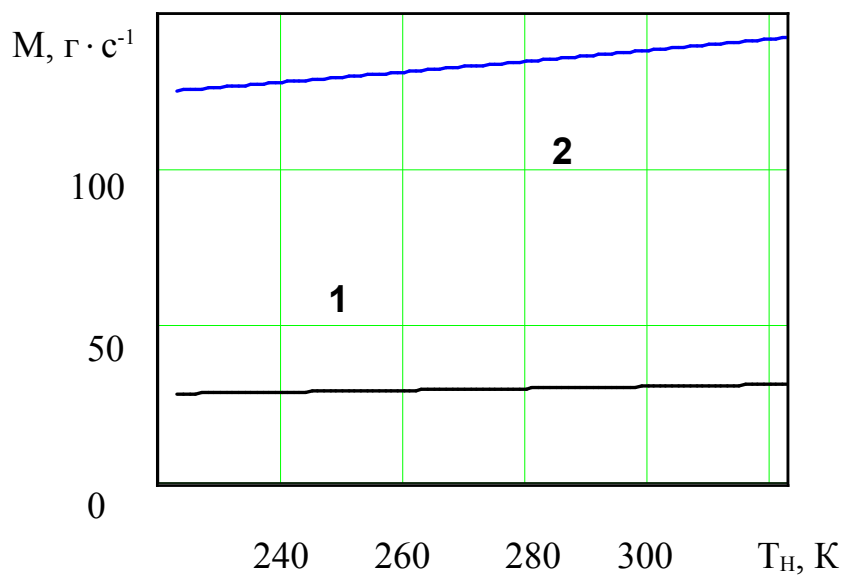


Рис. 4.12. Зависимость массового расхода от начальной температуры заряда 1 – для АГС–2 при $d_{зар} = 14$ см, $L = 13$ см; 2 – при $h = 3.2$ см, $\ell = 13.6$ см

площади поверхности горения приводит к росту величины массового расхода в сравнении с характеристиками базового генератора АГС-2 более чем в 4 раза. Необходимо отметить, что во втором случае величина массового расхода в большей степени подвержена влиянию начальной температуры заряда.

При проектировании ГОА с канальным зарядом необходимо учесть следующие требования (особенности конструктивного исполнения):

- минимальный диаметр каналов d_B , d_H должен определяться из условия: обеспечение докритического режима истечения продуктов сгорания из каналов, имеющих площадь S_{KAN} , то есть должно выполняться следующее неравенство $S_{KAN} > S_{KP}$, где S_{KP} – площадь критического сечения канала;
- в связи с наличием контакта горячих газов с корпусом ГОА по всей его поверхности, в конструкции ГОА должен быть предусмотрена либо эффективная его теплоизоляция, либо сам корпус должен быть толстостенный;
- для крепления заряда АОС в корпусе генератора, необходимо применять специальные устройства, предотвращающие выброс элементов заряда при сгорании;
- для снаряжения ГОА нужно использовать заряды с рецептурой, обеспечивающей стабильность геометрической формы, в течение всего срока эксплуатации устройства.

К преимуществам схемы ГОА с канальным зарядом можно отнести следующее:

- достаточно малое время выгорания заряда, следовательно, и время работы ГОА;
- масса заряда АОС, которым снаряжен ГОА, определяется требуемой оптимальной интенсивностью подачи огнетушащего аэрозоля.

Вместе с тем, генератор, который снабжен канальным зарядом, имеет такие недостатки:

- сравнительно низкий коэффициент заполнения камеры;
- присутствуют дополнительные устройства, фиксирующие заряд в корпусе.

Указанные недостатки приводят к ухудшению удельной массовой эффективности ГОА.

Таким образом, рассмотренная схема может быть рекомендована при проектировании генератора с массой заряда АОС до 3 кг и продолжительностью работы от 10 до 30 с.

Вариант 3.

Предлагается телескопическая схема размещения заряда (рис. 4.13). Внутри корпуса имеющего форму правильного цилиндра расположен заряд 1, имеющего форму полого цилиндра с параметрами d_H – наружный диаметр, d_B – внутренний диаметр цилиндра. В центре помещен заряд 2 того же состава с диаметром $d_{Ц}$. Для реализации нейтрального режима подачи огнетушащего аэрозоля необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$d_{Ц} = d_H - d_B.$$

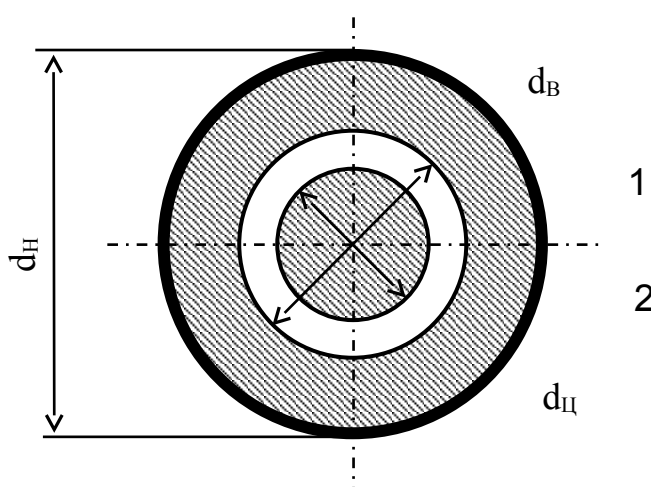


Рис. 4.13. Вариант компоновки телескопического заряда АОС:
1 – центральный заряд; 2 – наружный заряд

Тогда, толщина сгоревшего слоя заряда 1 будет равна толщине слоя заряда 2. Длительность работы ГОА будет определяться в зависимости от свойств заряда, выражениями (3.10)–(3.14), где вместо L длины заряда, необходимо подставить выражение для толщины сгоревшего слоя h , который равен

$$h = R_H - R_B.$$

Площадь поверхности горения на протяжении всего времени работы будет оставаться постоянной и численно будет равна

$$S_3 = \pi \cdot d_H \cdot \ell,$$

где ℓ – длина шашек 1 и 2.

На рис. 4.14 представлена зависимость времени работы ГОА от начальной температуры заряда 1 – для генераторов марки АГС-2 и 2 – телескопического заряда, размещенного в корпусе с теми же габаритными размерами. Как и в предыдущем случае, на время работы ГОА с телескопическим зарядом изменение температуры окружающей среды оказывает слабое влияние. Это объясняется скоротечностью процесса работы генератора. Очевидно, в сравнении с характеристиками генератора АГС-2 удалось добиться снижения времени работы в 4 раза. Величина массового расхода у генератора с усовершенствованной конструкцией возросла в 3 раза (рис. 4.5). Данный факт объясняется увеличением площади поверхности горения по сравнению в варианте торцевого горения в генераторе АГС-2. Как следствие, интенсивность подачи огнетушащего аэрозоля для генератора с телескопическим зарядом возрастет, так как масса заряда АОС осталась неизменной, следовательно, количество получаемого аэрозоля останется прежним, а время работы генератора сократилось.

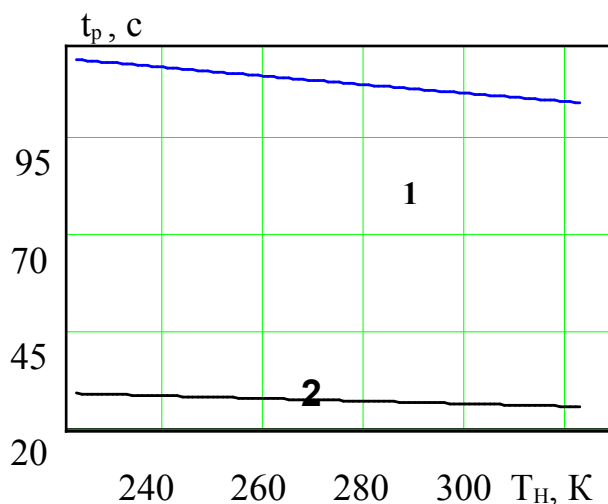


Рис. 4.14. Зависимость времени работы генераторов от начальной температуры заряда: 1 – АГС-2; 2 – ГОА с телескопическим зарядом

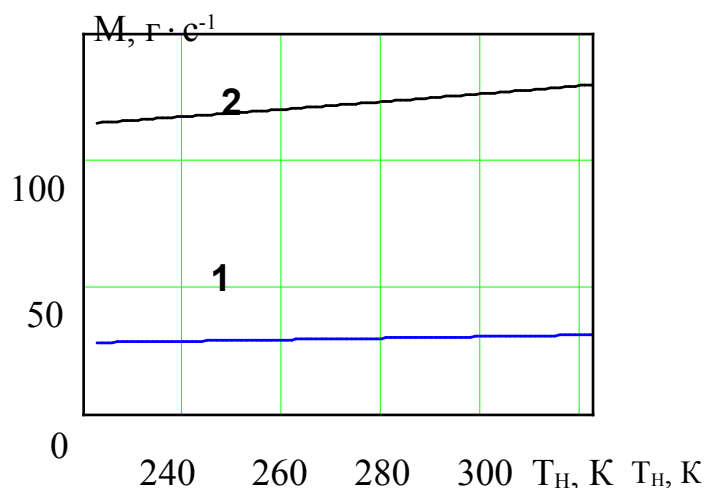


Рис. 4.15. Зависимость величины массового расхода генераторов от начальной температуры заряда: 1 – АГС-2; 2 – ГОА с телескопическим зарядом

Преимущества телескопической схемы размещения заряда в следующем:

- воспламенение заряда производится от одного инициирующего устройства;
- процесс горения заряда происходит в двух направлениях;
- во время сгорания заряда отсутствует контакт продуктов сгорания со стенками корпуса ГОА;
- заряд надежно крепится к стенкам корпуса и центральной оси, за счет адгезии с материалом корпуса;
- коэффициент заполнения камеры ГОА приближается к наибольшему значению.

С учетом рассмотренных достоинств телескопической схемы размещения заряда АОС ее применение целесообразно для генераторов с массой заряда АОС превышающей 3 кг.

Сравнительный анализ рассмотренных вариантов схем компоновки зарядов АОС показал, что наиболее эффективное решение задачи

минимизации времени работы ГОА, при условии обеспечения заданного значения его расходных характеристик, возможно в случае применения схемы со сложным телескопическим зарядом (рис. 4.16). Для обеспечения постоянства расходных характеристик необходимо, что бы размеры вложенных зарядов удовлетворяли условию постоянства во времени площади поверхности горения:

$$R_2 = 3 \cdot R_1 + \delta h_1; \quad R_3 = 4 \cdot R_1 + \delta h_2$$

где R_1 – радиус цилиндра 1, R_2 – наружный радиус цилиндра 2, R_3 – радиус цилиндра 3, δh_1 – расстояние между цилиндром 1 и 2, δh_2 – расстояние между цилиндром 2 и 3.

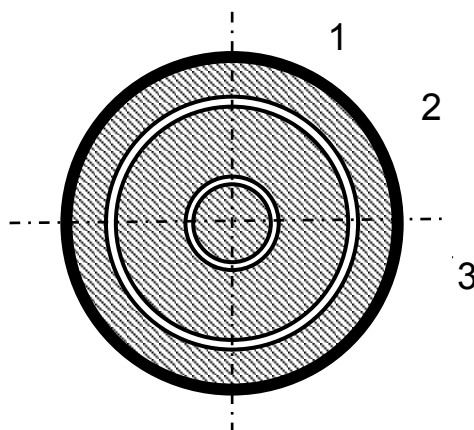


Рис. 4.16. Вариант компоновки сложного телескопического заряда АОС: 1 – центральный заряд; 2 – промежуточный заряд; 3 – наружный заряд

Таким образом, использование телескопической схемы размещения заряда АОС в корпусе ГОА позволяет создавать модификации генераторов с улучшенными характеристиками.

4.4. Выводы

4.4.1. Для проведения экспериментальных исследований создана установка, которая позволяет определять продолжительность переходного процесса в камере генератора, время его работы и скорость горения заряда АОС. Предложена методика проведения эксперимента для определения технических характеристик ГОА.

4.4.2. Проведенные экспериментальные исследования времени работы ГОА подтвердили адекватность математической модели, полученной теоретическим путем, при этом показано, что полученная модель описывает процессы с погрешностью несовпадения не более 15%.

4.4.3 Показано, что при проектировании ГОА для защиты объемов до 2 м³ возможно использование заряда торцевого горения, при этом должно выполняться условие диаметр заряда значительно больше его длины.

4.4.4. Показано, что при проектировании генераторов с массой заряда АОС до 3 кг для того, что бы обеспечить продолжительность работы в пределах 10÷30 с необходимо использовать заряд АОС с внутренним каналом, горящий по наружной и внутренней поверхности.

4.4.5. Сравнительный анализ различных вариантов компоновки заряда АОС показал, что наилучшие характеристики имеет генератор с телескопическим зарядом, который превосходит существующие модели генераторов серии АГС по времени работы в 4 раза, по величине массового расхода более чем в 3 раза. Показано, что при синтезе генератора с наименьшим временем работы при максимальном массовом расходе аэрозоля, целесообразно использовать схему сложного телескопического заряда АОС.

ВЫВОДЫ

В работе получены новые научно обоснованные результаты, которые в совокупности обеспечивают решение научно-практической задачи относительно обоснования возможности создания генераторов огнетушащего аэрозоля с улучшенными характеристиками.

1. Показано, что среди современных огнетушащих веществ, которые используются при объемному тушении пожаров класса В и подкласса А2, самыми эффективными являются огнетушащие аэрозоли.

2. Анализ особенностей построения систем аэрозольного пожаротушения показал, что они имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными системами объемного гашения, а именно отсутствие емкостей, находящихся под давлением, для хранения огнетушащего вещества, отсутствие трубопроводов для его доставки, низкая металлоемкость системы, простота технического обслуживания системы, продолжительный срок эксплуатации.

3. Анализ особенностей схемных решений существующих ГОА и тенденций относительно усовершенствования их характеристик показал, что основными направлениями повышения их эффективности является снижение температуры продуктов сгорания заряда АОС, исключение возможности попадания недоокисленных компонентов в защищаемый объем, а также усовершенствование таких технических характеристик ГОА, как время работы, быстродействие, массовый расход огнетушащего аэрозоля.

4. Получен комплекс математических моделей, который описывает процессы, протекающие в ГОА, в основе которого лежат законы сохранения массы и энергии, а так же уравнение состояния идеального газа, представленные в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений.

5. Показано, что динамические свойства генератора огнетушащего аэрозоля адекватно определяются характеристиками совокупности двух аperiодических звеньев (с различными постоянными времени) и форсирующего звена первого порядка.

6. С использованием методов имитационного моделирования в сочетании с методами теории планирования эксперимента, получены зависимости продолжительности переходного процесса в ГОА, продолжительности работы ГОА, массового расхода аэрозоля, применительно к генераторам с улучшенными характеристиками. И показано, что на продолжительность переходного процесса в генераторе существенным образом влияют плотность заряда, температура и скорость его горения.

7. С использованием критерия минимума времени формирования огнетушащей концентрации аэрозоля в защищаемом объеме, решена задача по выбору параметров ГОА при ограничениях, которые накладываются на параметры заряда АОС.

8. Для проведения экспериментальных исследований создана установка, которая позволяет определять продолжительность переходного процесса в камере генератора, время его работы и скорость горения заряда АОС. Предложена методика проведения эксперимента для определения технических характеристик ГОА.

9. Экспериментальные исследования времени работы ГОА подтвердили адекватность математической модели, полученной теоретическим путем. При этом показано, что полученная модель описывает процессы с погрешностью несоответствия не больше 15%.

10. Анализ вариантов компоновки заряда АОС показал, что наилучшие характеристики имеет генератор с телескопическим зарядом, характеристики такого генератора превосходят существующие серийные генераторы по времени работы в 4 раза, по величине массового расхода более чем в 3 раза. Показано, что при синтезе генератора с наименьшим

временем работы при максимальном массовом расходе аэрозоля, целесообразно использовать схему сложного телескопического заряда АОС.

11. Результаты исследований внедрены в НПФ "Бранд–Мастер" (г. Киев), ООО "Крайз" (г. Полтава), ООО ПИ "Электропром" (г. Харьков) при разработке новых модификаций ГОА и оптимизации характеристик систем аэрозольного пожаротушения, создаваемых для разнообразных объектов. Положительный эффект от результатов внедрения достигается вследствие сокращения на 40% времени создания необходимой огнетушащей концентрации в защищаемом помещении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики. – Харьков: МВД Украины, 1993, 288 с.
2. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. –М.: Наука, 1969, – 824 с.
3. Агафонов В.В., Жевлаков А.Ф., Копылов Н.П. и др. Модульные установки газоаэрозольного пожаротушения. // Проблемы предотвращения и тушения пожаров на объектах народного хозяйства: Материалы XI научно–практической конференции. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1992. – С. 159–160.
4. Агафонов В.В., Жевлаков А.Ф., Копылов Н.П. и др. Свойства аэрозолеобразующего состава СБК – 2(М) // Научно–техническое обеспечение противопожарных и аварийно–спасательных работ: Материалы XII Всероссийской научно–практической конференции. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1993. – С.159–161.
5. Агафонов В.В., Копылов Н.П. Установки аэрозольного пожаротушения: элементы и характеристики, проектирование, монтаж и эксплуатация. – М.: ВНИИПО, 1999. –232 с.
6. Агафонов В.В., Жевлаков А.Ф., Копылов Н.П., Николаев В.М. Перспективы применения установок аэрозольного пожаротушения. // Научно–техническое обеспечение противопожарных и аварийно–спасательных работ: Материалы XII Всероссийской научно–практической конференции. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1993. – С. 161–162.
7. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. –М.: Металлургия, 1968. – 155 с.
8. Аликин В.Н., Кузьмицкий Г.Э., Степанов А.Е. и др. Конструкция генераторов огнетушащего аэрозоля на смесевом твердом топливе //

- Технологическая механика: Вестник ПГТУ. – Пермь: – 1996. – №2. – С.131–135.
9. Аликин В.Н., Кузьмицкий Г.Э., Степанов А.Е., Федченко Н.Н. Отработка и производство смесевых аэрозолеобразующих огнетушащих составов в условиях сужающейся сырьевой базы // Конверсия организаций и предприятий технической химии: Тез. докл. конф. АНРТ и КГТУ. – Казань: 1997. – С. 38 – 39.
10. Аликин В.Н., Кузьмицкий Г.Э., Степанов А.Е., Федченко Н.Н. Средства аэрозольного пожаротушения на основе смесевых твердотопливных составов // Конверсия организаций и предприятий спецхимии и спецтехнологии: Материалы науч. – практ. конф. 19 – 22 июня 1996 г. – Казань: 1996. – С.49–50.
11. Аликин В.Н., Кузьмицкий Г.Э., Степанов А.Е. Автономные системы аэрозольного пожаротушения на твердом топливе. – Пермь: ПНЦ УрО РАН, 1998. – 148 с.
12. Аликин В.Н., Кузьмицкий Г.Э., Степанов А.Е., Федченко Н.Н. Генераторы огнетушащего аэрозоля "АПГ" на основе смесевых твердотопливных составов // Научные полимеры и двойные технологии технической химии: Тез. докл. II Уральской конф. – Пермь: 1997. – С.133–134.
13. Аликин В.Н., Сергиенко А.Д., Степанов А.Е. О компоновке рецептур аэрозолеобразующих огнетушащих составов // Технологическая механика: Вестник ПГТУ. – Пермь. – 1996. – № 2. – С.165–168.
14. Андреев В.А., Воробьев Е.И., Копылов Н.П. Проблемы создания и внедрения аэрозольных установок пожаротушения // Научно–техническое обеспечение противопожарных и аварийно–спасательных работ: Материалы XII Всероссийской научно–практической конференции. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1993. – С. 146–147.

15. Ашмарин И.П., Васильев Н.Н., Амбросов В.А. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов. – Л.: Изд. Ленингр. ун-та, 1974. – 76с.
16. Баратов А.Н. Проблемы современных средств и способов пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. – 1992. – Т.1, №2. – С. 56–60.
17. Баратов А.Н., Иванов Е.Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтехимической промышленности. – М.: Химия, 1979. – 368 с.
18. Баратов А.Н., Мышак Ю.А. Проблемы аэрозольного пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. – 1994. – Т.3, №2. – С.53–59.
19. Баратов А.Н., Мышак Ю.А., Радченко С.А. Исследование огнетушащей способности аэрозольных составов // Проблемы предотвращения и тушения пожаров на объектах народного хозяйства: Материалы XI научно–практической конференции. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1992. – С. 171–172.
20. Бахман Н.Н., Беляев А.Ф. Горение гетерогенных конденсированные систем. – М.: Наука, 1967. – 227 с.
21. Беляков В.И., Голубев А.Д., Крауклиш И.В. и др. Высокоэффективные составы для генераторов аэрозольного пожаротушения // Конверсия организаций и предприятий спецхимии и спецтехнологии: Материалы науч. – практ. конф. 19 – 22 июня 1996 г. – Казань: 1996. – С.52.
22. Болодьян И.А., Глухов И.С., Пуцев Д.И. Математическое моделирование процессов переноса газоаэрозольных смесей в объеме помещения // Научно–техническое обеспечение противопожарных и аварийно–спасательных работ: Материалы XII Всероссийской научно–практической конференции. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1993. – С. 164–165.
23. Бондаренко С.Н. Анализ временных характеристик генератора огнетушащего аэрозоля // Крупные пожары: предупреждение и

- тушение: Материалы XVI науч.–практ. конф. – Ч.2. – М.: ВНИИПО, 2001. – С. 204–206
- 24.Бондаренко С.Н. Анализ динамических характеристик генератора огнетушащего аэрозоля // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 9. – Харьков: Фолио, 2001. – С. 20–25.
 - 25.Бондаренко С.Н. Анализ моделей скорости горения твердотопливных зарядов // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 12. – Харьков: Фолио, 2002. – С. 30–34.
 - 26.Бондаренко С.Н. Анализ современных средств объемного пожаротушения // Материалы VI науч.–практ. конф. «Пожарная безопасность». – Харьков: АПБУ, 2003. – С. 49–51.
 - 27.Бондаренко С.Н. Анализ факторов, влияющих на скорость горения твердотопливных зарядов генераторов огнетушащего аэрозоля // Тезисы Междунар. науч.–практ. конф. «Ликвидация аварий и их последствий». – Донецк: Респиратор, 2002. – С. 23–24.
 - 28.Бондаренко С.Н. Класифікація сучасних модифікацій генераторів вогнегасячого аерозолю // Матеріали наук.-практ. конф. «Наглядово-профілактична діяльність в МНС». – Харків: АЦЗУ, 2004. – С. 16–18.
 - 29.Бондаренко С.Н. Обзор современных средств объемного тушения // Пожежна безпека 2001: Зб. наук. пр. – Львів: Сполом, 2001. – С.174–176
 - 30.Бондаренко С.Н. Область применения генераторов огнетушащих аэрозолей в практике пожаротушения // Пожежна безпека: Матеріали III науково-практичної конференції. – К.: УкрНДІПБ, 1997. – С. 317
 - 31.Бондаренко С.Н. Оценка времени работы генератора огнетушащего аэрозоля // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 7. – Харьков: Фолио, 2000. – С. 32–35.
 - 32.Бондаренко С.Н. Оценка массы огнетушащего аэрозоля образуемого генератором // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 11. – Харьков: Фолио, 2002. – С. 30–34.

- 33.Бондаренко С.Н. Применение генераторов огнетушащего аэрозоля в составе автоматических установок пожаротушения, вопросы математического моделирования // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 3. –Харьков: ХИПБ, 1998. – С. 25–28.
- 34.Бондаренко С.Н. Средства аэрозольного пожаротушения, как часть регулируемой системы автоматического пожаротушения. // Пожежна безпека: Науковий збірник – Черкаси: ЧПБ МВС України, 1999. – С. 148–150.
- 35.Бондаренко С.Н. Упрощенная математическая модель камеры сгорания генератора огнетушащего аэрозоля // Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков: Материалы XV науч.–практ. конф. – Ч.1. – М.: ВНИИПО, 1999. – С. 335–336
- 36.Бондаренко С.Н. Упрощенная математическая модель процессов в камере генератора огнетушащего аэрозоля. // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 5. –Харьков: ХИПБ, 1999. –С. 50–53.
- 37.Бондаренко С.Н., Стреляный В.В. Анализ характеристик генераторов огнетушащих аэрозолей как перспективных средств объемного тушения // Пожежна безпека: Матеріали III науково–практичної конференції. – К.: УкрНДІПБ, 1997. – С. 324–325
- 38.Бубырь Н.Ф., Бабуров В.П., Мангасаров В.И. Пожарная автоматика. – М.: Стройиздат, 1975. – 150 с.
- 39.Бугров Я.С., Никольский С.М. Высшая математика. Дифференциальное и интегральное исчисление. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 432 с.
- 40.Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – К.: Техніка, 1975, – 168 с.
- 41.Воронов А.А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. – М.: Энергия, 1980. – 312с.

42. Генератор огнетушащего аэрозоля (ГОА) "ОСА – 20"; "ОСА – 60":
Техническое описание и инструкция по эксплуатации / ООО "ОЗОН – ПЕРМЬ", 1997. – 8 с.
43. Дымовой пиротехнический состав для тушения подземных пожаров:
А.с. 192669 СССР, МКП С 06 d E 21 f / А.И. Сидоров, Р.А. Лабутич, В.Д. Зенин и др. – № 853395/23-26; Заявлено 20.08.63; Опубл. 06.02.67, Бюл. № 5. – 1 с.
44. Дымовой состав для тушения подземных пожаров: А.с. 238352 СССР, МКИ А 62d E21f / А.И. Сидоров, Р.С. Стулова, В.Д. Зенин, Т.Д. Филимонова. – № 911591/23-26; Заявлено 16.08.64; Опубл. 20.02.69, Бюл. № 9. – 1 с.
45. Егорычев С.М. Особенности горения аэрозольных огнетушащих составов // Научные труды и двойные технологии технической химии: Тез. докл. II Уральской конференции. – Пермь: 1997. – С.83–84.
46. Жуков Б.П., Денисюк А.П., Шепелев Ю.Г. и др. Высокоэффективное пожаротушащее топливо // Материалы XXI международного пиротехнического семинара. – М.: 1995. – С. 1018 – 1032.
47. Зельдович Я.Б., Ляпунский О.И., Либрович В.Б. Теория нестационарного горения пороха. – М.: Наука, 1975. – 118 с.
48. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента / А.Е. Егоров, Г.Н. Азаров, А.В. Коваль / Под ред. В.Г. Воронова. – Харьков: Вища шк., 1986. – 240 с.
49. Копылов Н.П. Хладоны и озоновый слой // Пожарная безопасность – история, состояние, перспективы: Материалы 14 Всероссийской науч.– практ. конф. – Ч. 2. – М.: ВНИИПО, 1997. – С. 326.
50. Копылов Н.П., Жевлаков А.Ф., Николаев В.Н., Андреев В.А. Создание систем аэрозольного пожаротушения // Юбилейный сб. трудов. – М.: ВНИИПО, – 1997. – С. 373–383.
51. Копылов Н.П. Новые направления разработок противопожарной техники // Эффективные системы пожаротушения на основе порохов и

- специальных твердых топлив: Материалы научного совета при Президиуме АН СССР, 4 декабря 1990 г. / Под ред. академика Б.П. Жукова. – М.: НПО "ИнформТЭИ", 1991. – С.10 – 16.
52. Копылов Н.П., Андреев В.А., Емельянов В.Н., Сидоров А.И. Технические возможности и перспективы применения аэрозольных средств тушения // Пожаровзрывобезопасность. – 1995. – Т.5, №4. – С.72–75.
53. Корольченко Д.А. Новое поколение газоаэрозольных генераторов // Пожаровзрывобезопасность. – 1998. – Т.7, № 2. – С.71–74.
54. Котов А.Г. Пожаротушение и системы безопасности. – К.: Репро-Графіка, 2003. – 270 с.
55. Кузьмицкий Г., Сергиенко А., Герштейн Ю. Аэрозольные огнегасительные составы: надежны и безвредны // Пожарное дело (Чрезвычайная ситуация). – 1993. – № 1–2. – С.32–36.
56. Ларионов Н.Н. Теплотехника. – М.: Стройиздат, 1985. – 432с.
57. Логинов С.В., Романьков А.В. Проблемы снижения температуры в генераторах огнетушащего аэрозоля // Пожарная безопасность, информатика и техника. – 1996. – № 4(18). – С. 72–74.
58. Мадякин Ф.П., Меденкус Л.А., Тихонова Н.А. Аэрозолеобразующие составы для тушения пожаров. // Аэрозоли. – 1996. – 2, №9. – С. 24.
59. Максимов Л.Н., Богатеев Г.Г., Журавлев И.В. Аэрозолеобразующие составы для тушения пожаров // Конверсия организаций и предприятий спецхимии и спецтехнологий: Реф. докл. науч.–практ. конф. 19–22 июня 1995 г. – Казань: 1996. – С.27–28.
60. Милицын Ю.А., Мамедов Ш.С. Создание источников для объемного газового тушения // Эффективные системы пожаротушения на основе порохов и специальных твердых топлив: Материалы научного совета при Президиуме АН СССР, 4 декабря 1990 г. / Под ред. академика Б.П. Жукова. – М.: НПО "ИнформТЭИ", 1991. – С. 23–27.

- 61.Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
- 62.НАПБ 01.038–2003. Правила проектування, монтажу та експлуатації автоматичних установок аерозольного пожежогасіння. Введ. 01.09.2003. – К.: Держбуд України, 2000. – 35 с.
- 63.НАПБ Б.01.004–2000. Правила технічного утримання установок пожежної автоматики. Введ. 28.02.2000. – К.: Держбуд України, 2000. – 67 с.
- 64.Новожилов Б.В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. – М.: Наука, 1973. – 224 с.
- 65.НПБ 21–98. Установки аэрозольного пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования и применения. Введ. 01.01.99. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1999. – 29 с.
- 66.НПБ 22–96. Установки газового пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования и эксплуатации. Введ. 02.09.96. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1996. – 30 с.
- 67.Пат. 1834669 SU, МПК А 62 С 35/00. Способ объемного тушения пожара и устройство для его осуществления / В.А. Быков, М.А. Иорданский, А.М. Полещук, В.Л. Румянцев. – № 5000674/12; Заявл. 29.07.91; Оpubл. 15.08.93; Бюл. №30. –8 с.
- 68.Пат. 19909083 Германия А 62 С 5/00 19/00. Способ и устройство для тушения пожара / R–Amtech Internanional, Inc. – № 19909083; Заявл. 02.03.99; Оpubл. 03.02.2000; Бюл. №4. –4 с.
- 69.Пат. 2001648 РФ, МПК А 62 D 1/00. Состав для тушения пожаров / Б.П. Перепеченко, Г.Г. Шахрай, Т.П. Коробенина и др.; Люберецкое НПО "Союз". – № 4878737/26; Заявл. 31.10.90; Оpubл. 30.10.93; Бюл. №39–40. –6 с.
- 70.Пат. 2005517 РФ, МПК А 62 С 3/00, А 62 D 1/00. Состав для тушения пожара / Б.П. Перепеченко, Т.П. Коробенина, Г.Г. Шахрай и др.;

- Люберецкое НПО "Союз". – № 5034846/12; Заявл. 30.01.92; Оpubл. 15.01.94; Бюл. №1. –12 с.
71. Пат. 2006239 РФ, МПК А 62 D 1/00. Аэрозолеобразующий огнетушащий состав / З.П. Пак, Б.П. Жуков, Н.А. Кривошеев и др.; Люберецкое НПО "Союз". – № 5028588/26; Заявл. 21.02.92; Оpubл. 30.01.94; Бюл. №2. –20 с.
72. Пат. 2008045 РФ, МПК А 62 С 3/00. Способ тушения пожара и устройство для его осуществления / О.Л. Дубрава, А.В. Романьков, А.И. Анискин; АО "Гранит–Саламандра". – № 5026917/12; Заявл. 11.02.92; Оpubл. 28.02.94; Бюл. №4. – 12 с.
73. Пат. 2022589 РФ, МПК А 62 D 1/00, С 06 В 25/18, 25/20. Аэрозольный огнетушащий состав / Б.П. Жуков, А.П. Денисюк, Б.М. Балоян и др.; Центр-технология энергетических конденсированных систем – № 92012181/23; Заявл. 15.12.92; Оpubл. 15.11.94; Бюл. №21. – 8 с.
74. Пат. 2028169 РФ, МПК А 62 С 13/22. Устройство для пожаротушения / З.П. Пак, Н.А. Кривошеев, Е.Ф. Жегров и др.; Люберецкое НПО "Союз". – №5040406/12; Заявл. 29.04.92; Оpubл. 09.02.95; Бюл. №4. – 6с.
75. Пат. 2031671 РФ, МПК А 62 С 13/22. Аэрозольный огнетушитель / Г.Э. Кузьмицкий, В.Н. Аликин, А.Е. Степанов и др.; Пермский з-д им. С.М. Кирова. – № 92012322/12; Заявл. 16.12.92; Оpubл. 27.4.95; Бюл. № 12. – 6с.
76. Пат. 2046614 РФ, МПК А 62 С 37/00. Устройство для обнаружения и объемного тушения пожара и дымообразующий состав / В.В. Агафонов, В.А. Андреев, А.Н. Баратов и др.; ВНИИПО. – №4925423/12; Заявл. 08.04.91; Оpubл. 27.10.95; Бюл. № 30. – 6 с.
77. Пат. 2076761 РФ, МПК А 62 D 01/00. Аэрозольобразующий твердотопливный состав для пожаротушения / А.Д. Сергиенко, Г.Э. Кузьмицкий, А.Е. Степанов; Пермский з-д им. С.М. Кирова. – № 93053256/25; Заявл. 24.11.93; Оpubл. 10.04.97; Бюл. № 10. – 10 с.

78. Пат. 2080137 РФ, МПК А 62 D 01/00. Аэрозольобразующий твердотопливный состав для пожаротушения / А.Д. Сергиенко, А.Е. Степанов; Пермский з-д им. С.М. Кирова. – № 93011211/25; Заявл. 02.03.93; Оpubл. 27.05.97; Бюл. № 15. – 12 с.
79. Пат. 2090227 РФ, МПК А 62 С 2/00. Способ объемного тушения пожаров и устройство для его осуществления / А.Н. Баратов, П.Г. Балагин, Ю.А. Мышак; – № 93043940/12; Заявл. 7.09.93; Оpubл. 20.09.97; Бюл. № 26. – 5 с.
80. Пат. 2096055 РФ, МПК А 62 С 13/22. Устройство для объемного тушения пожаров / Б.А. Коршунов, А.И. Сидоров, Н.А. Силин, В.Н. и др.; Научно-исследовательский институт прикладной химии. – № 94045533/12; Заявл. 29.12.94; Оpubл. 20.11.97; Бюл. № 32. – 6 с.
81. Пат. 2085236 РФ, МПК А 62 С 19/00, 05/00. Устройство для объемного тушения пожаров / Г.Э. Кузьмицкий, В.Н. Аликин, А.Е. Степанов и др.; Пермский з-д им. С.М. Кирова. – № 95120501/12; Заявл. 05.12.95; Оpubл. 27.07.97; Бюл. № 23. – 4 с.
82. Пат. 2114657 РФ, МПК А 62 С 3/00. Аэрозольный генератор для тушения пожаров / О.Л. Дубрава, С.В. Логинов, А.В. Романьков; АО "Гранит-Саламандра". – № 96120949/12, Заявл. 23.10.96; Оpubл. 10.07.98; Бюл. № 19. – 5 с.
83. Пат. 2118191 РФ, МПК А 62 С 3/00 13/22. Устройство для объемного тушения пожаров / Г.И. Тягунов, А.Н. Плескач, И.П. Гусев, Г.С. Бабурин; ОАО "Эталон". – № 97111057/12; Заявл. 27.06.97; Оpubл. 27.08.98; Бюл. № 24. – 4 с.
84. Пат. 2163495 РФ, МПК А 62 С 13/22. Аэрозольный генератор для тушения пожаров / В.Г. Щетинин, А.В. Романьков, С. Цафоурек; Ин-т хим. физ. РАН им. Н.Н. Семенова. – № 2000105978/12; Заявл. 14.03.2000; Оpubл. 27.02.2001. Бюл. № 12. – 3 с.
85. Пат. 2164808 РФ, МПК А 62 С 13/22, 35/00. Устройство для объемного аэрозольного тушения пожара / М.Г. Власов, О.Л. Дубрава,

- В.Н. Козырев, О.В. Шумяцкий; ОАО "Гранит–Саламандра". – № 99108403/12; Заявл. 28.04.1999; Оpubл. 10.04.2001; Бюл. № 5. – 4 с.
86. Перепеченко Б.П., Коробенина Т.П., Шахрай Г.Г., Милицин Ю.А. Новые типы порохов – источники аэрозолей для систем пожаротушения и предотвращения взрыва газовоздушных смесей // Пороха и твердые специальные топлива в народном хозяйстве. – М.: ЦНИИНТИКПК, 1990. – С.18–21.
87. Полтев А.И. Элегазовые аппараты. – Л.: Энергия, 1971. – 57с.
88. Райзберг Б.Р., Ерохин Б.Г. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах твердого топлива. – М.: Машиностроение, 1972. – 548 с.
89. Русанов В.Д., Крауклиш И.В. Системы пожаротушения на основе аэрозольных генераторов // Эффективные системы пожаротушения на основе порохов и специальных твердых топлив: Материалы научного совета при Президиуме АН СССР, 4 декабря 1990г./ Под ред. академика Б.П. Жукова. – М.: НПО "ИнформТЭИ", 1991. – С.31–34.
90. Силин Н.А., Веретинский П.Г., Сидоров А.И. и др. Пиротехнические аэрозолеобразующие составы и средства объемного пожаротушения на их основе // Взрывчатые материалы и пиротехника. – 1993. – Вып.1 – 2 – С.17 – 21.
91. Силин Н.А., Емельянов В.Н., Сидоров А.И., Вареных Н.М. Пиротехнические аэрозолеобразующие составы и средства объемного пожаротушения на их основе // Материалы XXI международного пиротехнического семинара. – М.: 1995. – С. 1043–1058.
92. Силин Н.А., Сидоров А.И., Хван С.Б. Аэрозолеобразующие составы и средства народнохозяйственного назначения // Пороха и твердые специальные топлива в народном хозяйстве. – М.: ЦНИИНТИКПК, 1990. – С.21–23.
93. Системы пожаротушения с применением экологически чистых инертных газов // Охранные системы. – 2001. – №4(22). – С. 24–25.

94. Смирнов Н.В., Чистов Н.С., Николаев В.М. и др. Охлаждающее воздействие диоксида углерода как средства пожаротушения в шкафах с радиоэлектронной аппаратурой // Пожаровзрывобезопасность. – 1992. – №4. С.51–53.
95. Собурь С.В. Установки пожаротушения автоматические: Справочник. – М.: Спецтехника, 2002. – 400 с.
96. Степанов А.Е., Старкова А.А., Каменских А.П. Влияние дисперсности идигола на скорость горения твердого топлива для генераторов огнетушащего аэрозоля // Научные полимеры и двойные технологии технической химии: Тез. докл. II Уральской конф. – Пермь, 1997. – С. 164–165.
97. Тарахно О.В., Михайлюк О.П., Бондаренко С.М. Перспективи використання аерозолеутворюючих вогнегасних складів на судах // Підвищення бойової ефективності, обґрунтування тактичних та технічних характеристик систем озброєння та техніки військово-морських сил України. Живучість корабля і безпека на морі: Зб. наук. пр. – Вип. 2. – Севастополь: СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2001. – С.74–77.
98. Таха Х. Введение в исследование операций: В 2-х книгах / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – Кн. 2. – 496 с.
99. Топольский Н.Г., Иванников В.Л., Черновский А.А. Автоматизация пожаротушения с использованием аэрозолеобразующих генераторов // Аэрозоли. – 1996. – 2, №9. – С. 25.
100. ТУ 4854–001–02070464–94. Генератор аэрозольного пожаротушения ОП – 517. Введ. 18.01.95. – 20 с. – Группа Г88.
101. Устройство для объемного тушения пожара: А.с. 1741821 СССР, МКП⁵ А 62 С5/00/ А.Ф. Жевлаков, В.И. Калинин, А.К. Костюхин и др. – № 3181263/12; Заявлено 02.10.87; Оpubл. 23.06.92; Бюл. №23. – 4 с.
102. Фогельзанг А.Е., Васильев В.В., Синдицкий В.П. и др. Горение пожаротушающих составов на основе нитрата калия // Эффективные системы пожаротушения на основе порохов и специальных твердых

- топлив: Материалы научного совета при Президиуме АН СССР, 4 декабря 1990г./ Под ред. академика Б.П. Жукова. – М.: НПО "ИнформТЭИ", 1991. – С.30–31.
103. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977. – 522 с.
 104. Шебеко Ю.Н., Корольченко А.Я., Горшков В.И. и др. Механизм огнетушащего действия средств аэрозольного пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. – 1996. – Т.5, № 1. – С. 57–61.
 105. Шидловский А.А. Основы пиротехники. – М.: Машиностроение, 1973. – 320 с.
 106. Шидловский А.А., Сидоров А.И., Силин Н.А. Пиротехника в народном хозяйстве. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
 107. Шишков А.А. и др. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
 108. Экологически чистое и эффективное пожаротушение // Охранные системы. – 2000. – №1(13). – С. 24–25.
 109. Эффективные системы пожаротушения от Cerberus // Охранные системы, – 2001. – №2(20). – С.22– 25.
 110. Bent M. Replacing halon // Fire Prev. – 2000, – № 334, – P. 36–37.
 111. Bonnett D. Halon phase out and extinguishers // Fire Safety Eng. – 2000. – Vol.7, № 2. – P. 45.
 112. Coxon P. Inergen. // Fire Safety Eng. –1995. –2, №4. –P. 20–23.
 113. Dubay C., Mawhinney J. Water mist technology evolves. // Fire Eng. J. – 2000. – Vol.60, № 206. – P. 16–21.
 114. Fire, Halon and the environment // Fire Safety Eng. – 1999. – № 5, – P. 36–37.
 115. Getting the green light // Fire Prev. – 2001. – № 343. – P. 4–7.
 116. Halon alternatives consortium // Fire Chief. – 1989. – Vol. 33, № 8. – P.10.

117. Hampson R.D. The success of FM-200 // Fire Safety Eng. –1995. –2, №1. –P. 21–23.
118. Hood C. High Pressure Water Mist // Fire Safety Eng. – 2001 – Vol. 8, №4. – P. 20–21.
119. ISO/CD/TC21 14520–8 Gaseous Media Fire Extinguishing Systems – 1996.
120. Kay R.S. Fine water spray – A halon replacement option // Fire surv. – 1993. – 22, №3. –P. 16–20.
121. Kibert C.J., Dierdorf D. Encapsulated Micron Aerosol Agent // Halon alternative technical working conference. May 11–13, 1993, Albuquerque. – New Mexico. – 1993.
122. Montreal. Protocol. Halons Technical Options Committee. 3rd Draft Report of the 1994, August 1994.
123. Race against time // Fire Prev. – 2002. – № 352. – P. 38–39.
124. Ramsden N. Water mist — a status update // Fire Prev. –1996. –№287. – P. 16–20.
125. Smith D.P. Water mist. Fire suppression on systems // Fire Safety Eng. – 1995. –2, №2. – P. 10–15.
126. Warner J., Howard D. MFCs — what's their future? // Fire J. – 2001 – Vol.93, № 1149. – P. 21.
127. Welch J. Which halon alternative? // Fire Prev. –1995. –№285, –P. 34–36.
128. Young R. Gaseous fire extinguishing agents as Halon 130 alternatives // Fire Prev. –1995. –№277. –P. 24–27.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Характеристики современных средств объемного пожаротушения

Таблица А.1.1

Нормативная объемная огнетушащая концентрация двуокиси углерода
(плотность паров при $p = 101,3$ кПа и $T = 20^\circ\text{C}$ составляет $1,88 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$)

Наименование горючего материала	ГОСТ, ТУ, ОСТ	Нормативная объемная огнетушащая концентрация, % (об.)
Н-гептан	ГОСТ 25823- 83	34,9
Спирт этиловый	ГОСТ 18300-87	35,7
Ацетон технический	ГОСТ 2768-84	33,7
Толуол	ГОСТ 5789-78	30,9
Спирт изобутиловый	ГОСТ 6016-77	33,2
Керосин осветительный	ТУ 38401-58-10-90	32,6
Растворитель 646	ГОСТ 18188-72	32,1

Таблица А.1.2

Нормативная объемная огнетушащая концентрация газообразного азота
(плотность паров при $p = 101,3$ кПа и $T = 20^\circ\text{C}$ составляет $1,17 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$)

Наименование горючего материала	ГОСТ, ТУ, ОСТ	Нормативная объемная огнетушащая концентрация, % (об.)
Н-гептан	ГОСТ 25823-83	34,6
Этанол		36,0
Бензин А-76		33,8

Масло машинное		27,8
----------------	--	------

Таблица А.1.3

Нормативная объемная огнетушащая концентрация газообразного аргона
(плотность газа при $p = 101,3$ кПа и $T = 20^\circ\text{C}$ составляет $1,66 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$)

Наименование горючего материала	ГОСТ, ТУ, ОСТ	Нормативная объемная огнетушащая концентрация, % (об.)
Н-гептан	ГОСТ 25823-83	39
Этанол		46,8
Бензин А-76		44,3
Масло машинное		36,1

Таблица А.1.4

Нормативная объемная огнетушащая концентрация газового состава
«Инерген» (плотность паров при $p = 101,3$ кПа и $T = 20^\circ\text{C}$ составляет $1,42 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$)

Наименование горючего материала	ГОСТ, ТУ, ОСТ	Нормативная объемная огнетушащая концентрация, % (об.)
Н-гептан	ГОСТ 25823-83	36,5
Этанол	ГОСТ 18300-72	36,0
Масло машинное		28,3
Ацетон технический	ГОСТ 2768-84	37,2

Таблица А.1.5

Нормативная объемная огнетушащая концентрация элегаза
(плотность паров при $p = 101,3$ кПа и $T = 20^\circ\text{C}$ составляет $6,474 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$)

Наименование горючего материала	ГОСТ, ТУ, ОСТ	Нормативная объемная огнетушащая концентрация, % (об.)
Н-гептан	ГОСТ 25823-83	10,0
Этанол	ГОСТ 18300-72	14,4
Ацетон		10,8
Трансформаторное масло		7,2

Таблица А.1.6

Нормативная объемная огнетушащая концентрация хладона 227еа
(плотность паров при $p = 101,3$ кПа и $T = 20^\circ\text{C}$ составляет $7,28 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$)

Наименование горючего материала	ГОСТ, ТУ, ОСТ	Нормативная объемная огнетушащая концентрация, % (об.)
Н-гептан	ГОСТ 25823-83	7,2
Толуол		6,0
Бензин А-76		7,3
Растворитель 647		7,3

Таблица А.1.7

Нормативная объемная огнетушащая концентрация хладона 125
(плотность паров при $p = 101,3$ кПа и $T = 20^{\circ}\text{C}$ составляет $5,208 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$)

Наименование горючего материала	ГОСТ, ТУ, ОСТ	Нормативная объемная огнетушащая концентрация, % (об.)
Н-гептан	ГОСТ 25823-83	9,8
Этанол	ГОСТ 18300-72	11,7
Вакуумное масло		9,5

Таблица А.1.8

Нормативная объемная огнетушащая концентрация хладона 318Ц
(плотность паров при $p = 101,3$ кПа и $T = 20^{\circ}\text{C}$ составляет $8,438 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$)

Наименование горючего материала	ГОСТ, ТУ, ОСТ	Нормативная объемная огнетушащая концентрация, % (об.)
Н-гептан	ГОСТ 25823-83	7,8
Этанол	ГОСТ 18300-72	7,8
Ацетон		7,2
Керосин		7,2
Толуол		5,5

Таблица А.1.9

Нормативная объемная огнетушащая концентрация хладона 218
(плотность паров при $p = 101,3$ кПа и $T = 20^\circ\text{C}$ составляет $7,85 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$)

Наименование горючего материала	ГОСТ, ТУ, ОСТ	Нормативная объемная огнетушащая концентрация, % (об.)
Н-гептан	ГОСТ 25823-83	7,2
Толуол		5,4
Бензин А-76		6,7
Растворитель 647		6,1

Таблица А.1.10

Огнетушащие характеристики различных объемных средств тушения

Класс пожара	Минимальная огнетушащая концентрация $\text{кг}/\text{м}^3$		
	огнетушащий аэрозоль	хладоны	порошки
А	0.05 – 0.1	0.8 – 1.2	0.4 – 0.6
В	0.03 – 0.05	0.2 – 0.35	0.25
С	0.2	1.3	0.8

Таблица А.1.11

Примеры составов баллистического типа

Компоненты	Массовые доли, %	
	Состав НПО "Союз"	Состав ЦТЭКС
Нитрат калия	40 – 70	40 – 70
Углерод	5 – 15	4.5 – 9.5
Гексоциано (III) феррат калия	–	0.2 – 10
Дифениламин, централит	0.5 – 2.0	0.5 – 2.0
Масло промышленное	0.5 – 2.5	0.5 – 2.0
Соли стеариновой кислоты	0.02 – 0.5	0.02 – 1.0
Фторопласт	–	0.1 – 4.0
Пластифицированная нитроцеллюлоза	10 – 54	2 – 55

Таблица А.1.12

Типовые рецептуры смесевых АОС

Компоненты рецептуры	Массовые доли, %			
	ПАС-11	СБК-2	Состав НПО им. С.М. Кирова	
			№ 1	№ 2
Перхлорат калия	2 – 25	10 – 40	83 – 85	–
Нитрат калия	45 – 76	0 – 79,5	–	63 – 68
Эпоксидная смола	10 – 14,5	1,5 – 15	–	–
Полиэфирная смола	–	7,5 – 30	–	–
Бутилкаучук ПДИ-3АК	–	–	13 – 15	17 – 19
Изометилтетрагидрофталевый ангидрид	12 – 15	1,5 – 15	–	–
Углерод	0,5	0,5	–	0 – 5
Сульфорицинат	0.01 – 0,5	0,01 – 0,5	–	–
Идитол	–	–	–	11 – 13
Каталитические добавки	–	–	0,5 – 2	0.5 – 5

Таблица А.1.13

Состав продуктов сгорания смесевых АОС

Основные продукты сгорания:	АОС		СБК–2	ПАС–11
	рец. №1	рец. №2		
газовая фаза, % об.:				
H ₂	1,78	43,31	39,97	23,94
H ₂ O	25,44	1,07	0,42	8,84
N ₂		12,92	13,55	12,19
CO	12,12	41,20	44,90	41.32
CO ₂	26,00	0,91	0,33	6,5
Ингибиторы, % масс. газообразные:				
K	1,60	—	0,55	2,36
KCl	39,66	—	—	4,85
KOH	2,13	—	0.08	3,71
конденсированные: K ₂ CO ₃ ,	—	50,26	49,20	35.79

Таблица А.1.14

Минимальная огнетушащая концентрация C_m ($\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$) АОС и хладона 114В2 для диффузионных пламен горючих веществ и материалов в воздухе

Горючее	СТК-5-1	СТК-24МФ	МГИФ (СТК-2МД)	СБК-2М (2)	ПАС-11-8 (47М)	ПТ-50 (4)	Е-1	Хладон 114В2
Ацетон	48	130-135	28-32	28-30	34-38	28-30	34	238
Гептан	65	140-155	38-42	36-40	48-56	33-39	45	240
Толуол	44	-	28	26-27	32-34	26	34	162
Этанол	46	135-140	33-34	32-33	-	-	-	267
Пропанол	70	135-145	38	36	46	38-39	46	220
Бензин А-76	48	140-145	35-36	34	42-44	35-36	38	215
Керосин	58	140-150	36	30-32	40-42	33-36	12	220
CH_4	70	155-165	38-40	38	52	37		320
H_2	220	-	150-160	140-150	-	-		1600
ПММА	54	145-150	30-35	30-33	47-49	27-33	38	283
Резина	54	135-140	30-31	30	38-40	29	36	270
Древесина	63	155-160	42-45	36-39	48-49	36-41	46	340
Полиэтилен	42	130	26-28	24-27	34-38	24	30	-

Таблица А.1.15

Токсичность огнетушащих аэрозолей АОС

Модификация АОС	HCL_{50} , г/м ³ (время экспозиции, мин)	Класс опасности веществ	$t_{доп}$, мин	Токсичные компоненты
СТК-5-1	240 (60)	Малоопасные	$\geq 15,0$	CO (N_xO_y)
СТК-2МД	80 (5)	Умеренно-опасные	$< 1,0$	CO, N_xO_y ,
СТК-24МФ	165 (5)	Малоопасные	$< 3,0$	CO, HCN,
СБК-2(3)М	220 (60)	Малоопасные	$< 15,0$	CO, N_xO_y
ПАС	165 (60)	Малоопасные	$< 15,0$	CO, (HCN,
ПТ-50	103 (60)	Малоопасные	$< 15,0$	CO, N_xO_y
ПТ-4	130 (60)	Малоопасные	$< 15,0$	CO, N_xO_y
Е-1	–	Малоопасные	$< 15,0$	CO (HCN,
СЭПТ	160 (15)	Малоопасные	$< 15,0$	CO, N_xO_y

Таблица А.1.16

Значения КОД для различных средств объемного пожаротушения

Огнетушащее средство (ОС)	Удельный огнетушащий расход (гептан), г/м ³	Наиболее озоноопасные химические соединения в ОС	КОД
Хладон 11	-	Cl	1,0
Хладон 1211 (12В1)	280	Cl, Br	3,0
Хладон 1301 (13В1)	230	Br	10,0
Хладон 2402 (114В2)	240	Br	6,0
Хладон 125	—	—	0
Углекислый газ	610	—	0
Е-1	50	N _x O _y	≈0
СТК-5-1	65	N _x O _y	≈0
СТК-5-20МД	45	HCN, N _x O _y	≈0,01
СТК-24МФ	145	HCN, N _x O _y	≈0
МГИФ	45	HCN, N _x O _y	≈0
СБК-3(М)	40	N _x O _y	≈0
ПАС-11	45	N _x O _y , Cl	≈0
ПАС-11 (с ХО)	120	N _x O _y , Cl	≈0,01
ПАС-47М	45	N _x O _y , Cl	≈0
ПАС-47М (с ХО)	120	N _x O _y , Cl	≈0,01
ПТ-4	40	N _x O _y , NH ₃	≈0
ПТ-4 (с ХО)	110	N _x O _y , NH ₃	≈0,01
СЭПТ	46	N _x O _y , NH ₃ , Cl	≈0
СЭПТ (с ХО)	110	N _x O _y , NH ₃ , Cl	≈0,01

Таблица А.1.17

Основные характеристики типовых АОС.

Модификация АОС	Тактико-технические характеристики АОС									
	$T_{\Gamma}, ^\circ\text{C}$	α_{OK}	$u_{\Gamma}, \text{мм/с}$	$t_{\text{доп}}, \text{мин}$	$V_{\Gamma}, \text{л/с}$	$u_{\text{Me}}, \text{мм/год}$	$T_{\text{СМВ}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ЭКСП}}, \text{лет}$	$\Delta T_{\text{ЭКСП}}, ^\circ\text{C}$	КОД
СТК-5-1	1250 ± 50	≈ 1	6.5 ± 1.5	10	0.2 ± 0.02	0.005	410	5	± 40	≈ 0
СТК-2МД	950 ± 50	0.45	3.0 ± 0.5	0.5	0.4 ± 0.05	0.005	460	5	± 50	≈ 0.01
СТК-5НТ	1000 ± 10 0	0.95	2.0 ± 1.0	1	0.3 ± 0.05	0.005	470	$5 \div 10$	± 45	≈ 0
СБК-2	1250 ± 50	0.46	1.6 ± 0.5	$5 \div 7$	0.54 ± 0.05	0.005	510	> 10	± 60	≈ 0
ПАС-47М	1250 ± 50	0.53	0.9 ± 0.5	5	0.52 ± 0.02	0.005	550	> 10	± 60	≈ 0
СЭПТ, ПТ-50	1150 ± 10 0	0.59	3.0 ± 1.0	$5 \div 7$	0.74 ± 0.07	0.005	240 ± 60	> 10	± 50	≈ 0
Рец.№1 НПО им. Кирова	2660 ± 10 0	0.93	1.0 ± 0.05	> 15	1.1 ± 0.1	0.005	400	> 10	± 50	≈ 0

Примечание T_{Γ} – температура горения АОС, α_{OK} – коэффициент обеспеченности окислителем, u_{Γ} – линейная скорость

горения АОС, $t_{\text{доп}}$ – допустимое время пребывания человека без средств защиты в атмосфере с огнетушащей концентрацией аэрозоля, $V_{\text{Г}}$ – газопроизводительность, $u_{\text{Ме}}$ – скорость глубинной коррозии металлов во влажной среде, $T_{\text{СМВ}}$ – температура самовоспламенения, $t_{\text{ЭКСП}}$ – продолжительность эксплуатации; $\Delta T_{\text{ЭКСП}}$ – диапазон температур эксплуатации; КОД – коэффициент озоноразрушающего действия.

Таблица А.1.18

Показатели механической прочности огнетушащих зарядов АОС

АОС	Технология формования зарядов	Температура испытаний, °С	Предел прочности при сжатии $\delta_{сж}$, МПа	Предел прочности при растяжении δ_p , МПа
СТК	Прессование	20	21	0,15
СТК	То же	50	6,0	0.1
СБК	Шнек-пресс	20	30	4.4
СБК	То же	50	25	0,5
ПАС	Литьевая	20	Более 70	Более 7,5
ПТ	Шнек-пресс	-50	-	24,0
ПТ	То же	20	5,5	1,2
ПТ	То же	50	1,7	0.5

Таблица А.1.19

Основные технические характеристики модуля газового пожаротушения
"Импульс–20"

№ п/п	Характеристика	Ед. изм.	Значение
1.	Вместимость корпуса	л	20 ± 0.5
2.	Масса огнетушащего заряда	кг	22 ± 0.1
3.	Температура срабатывания модуля	°С	72
4.	Продолжительность выпуска состава	с	10
5.	Защищаемый объем	м³	$33 \div 43$
6.	Диапазон температур эксплуатации	°С	$-20 \div +52$

Таблица А.1.20

Основные технические характеристики модуля порошкового
пожаротушения "Пума-2П"

№ п/п	Характеристика	Ед. изм.	Значение
1.	Вместимость корпуса	л	14.5 ± 0.5
2.	Масса огнетушащего порошка	кг	12 ± 0.1
3.	Температура срабатывания модуля	°С	72
4.	Продолжительность подачи порошка	с	24
5.	Защищаемый объем	м ³	50
6.	Полная масса модуля	кг	24
7.	Диапазон температур эксплуатации	°С	$-20 \div +50$
8.	Срок службы до списания	лет	10

Приложение Б

Классификация генераторов огнетушащего аэрозоля

В настоящее время разработкой и внедрением АОС и генераторов занимается более десятка предприятий и организаций. На сегодняшний день существует более двадцати различных рецептур АОС. Разработано и прошло различную степень экспериментальной отработки более ста модификаций генераторов огнетушащего аэрозоля. Разработанные генераторы сильно отличаются по своим тактико-техническим характеристикам. Так, масса заряда АОС в них изменяется от 8 г до 10 кг, масса снаряженного генератора — от 15 г до 70 кг. Время выпуска аэрозоля находится в пределах от 4 до 240 с. Большинство генераторов содержат в своем составе устройства для снижения температуры образующейся аэрозольной смеси.

Генераторы огнетушащего аэрозоля различного назначения разделяют по следующим основным признакам (рис. Б.1):

- виду компоновки;
- способу применения;
- виду инициирующего устройства (способу пуска);
- температуре горения заряда АОС;
- температуре огнетушащего аэрозоля на выходе ГОА;
- виду охлаждающего устройства;
- виду схемы конструкции ГОА;
- типу АОС;
- условиям горения заряда АОС;
- времени подачи огнетушащего аэрозоля;
- закону изменения расходных характеристик;
- способу приведения в действие;

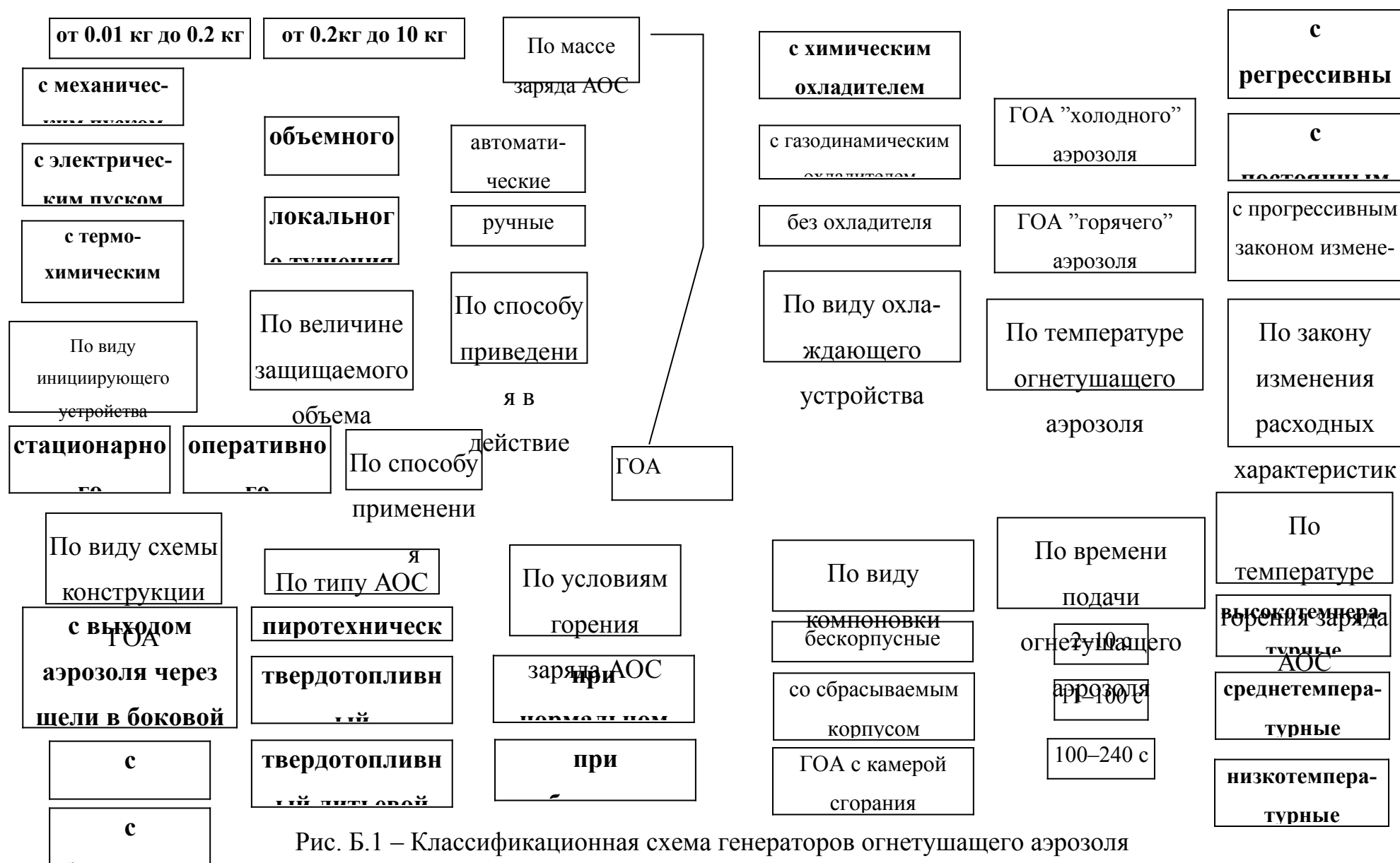


Рис. Б.1 – Классификационная схема генераторов огнетушащего аэрозоля

- величине защищаемого объема.

По видам компоновки генераторы огнетушащего аэрозоля условно классифицируют на следующие группы:

- бескорпусные генераторы — огнетушащий заряд АОС с узлом инициирования или без него расположен в защитной оболочке на несгораемой панели и размещается в защищаемом объеме; процесс аэрозолеобразования протекает при разрушении или плавлении защитной оболочки непосредственно в атмосфере защищаемого объема;
- генераторы со сбрасываемым корпусом — огнетушащий заряд АОС и узел инициирования жестко установлены в защитном корпусе, который после пуска сбрасывается; процесс аэрозолеобразования протекает непосредственно в атмосфере защищаемого объема;
- генераторы с камерой сгорания — огнетушащий заряд АОС и узел инициирования жестко установлены в защитном корпусе, одновременно являющемся камерой сгорания; процесс аэрозолеобразования протекает в корпусе с последующей подачей аэрозоля в защищаемый объем.

Наибольшее распространение (порядка 94%) получили генераторы третьего вида — с камерой сгорания, как самые практичные и безопасные.

По способу применения генераторы подразделяются:

- на устройства оперативного применения;
- на стационарно размещаемые ГОА.

К первой группе относятся так называемые переносные, а точнее забрасываемые, генераторы. Они приводятся в действие человеком, обнаружившим пожар, с помощью термомеханического пускового устройства. Генератор снабжен рукояткой для удержания во время пуска, вес его, как правило, не превышает 5 кг. Как показывает анализ (рис. Б.2), забрасываемые ГОА составляют 10 % от общего числа промышленно выпускаемых генераторов,

но только одна модификация этих устройств сертифицирована к применению на территории Украины. Это обусловлено отсутствием методик по применению этих средств при тушении пожаров и нормативной базы, регламентирующей эти вопросы.

Основные технические характеристики генераторов оперативного применения представлены в табл. Б.1

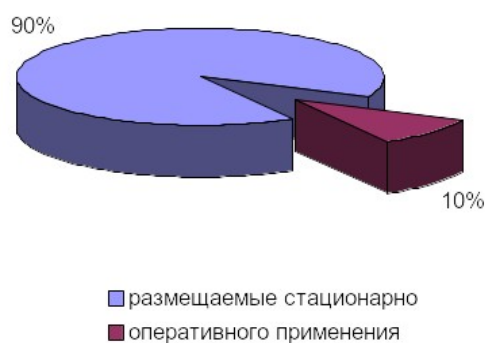


Рис. Б.2. Распределение ГОА по способу применения

Таблица Б.1

Основные технические характеристики ГОА оперативного применения

№ п/п	Марка ГОА	Характеристики ГОА					
		защища- емый объем, м ³	масса ГОА, кг	масса заряда АОС, кг	время работы, с	габаритные размеры	
						диаметр, мм	длина, мм
1.	АПГ-1	15	1,1	1,0	60	85	140
2.	ОАЗИС-8	8	0,8	0,8	60	65	135
3.	ОАЗИС-15	15	1,3	1,3	60	85	140
4.	ОАЗИС-15К	15	1,3	1,2	60	85	140
5.	СОТ-5М	40	5	3	70	210	110
6.	АГС-5	60	4,6	2,7	24	210	112
7.	Пурга-Гран-К-1	20	1,4	1,0	20÷25	98	220
8.	Пурга-Гран-М-3	60	4,5	3,0	20	245	150

9.	ДОПИНГ-2.5	5	1,9	1,75	20	80	220
10.	ДОПИНГ-2.10	10	3,9	3,6	20	105	320

В зависимости от вида устройства, которое формирует тепловой импульс для поджигания основного заряда АОС, различают генераторы:

- с электрическим пуском;
- с тепловым пуском;
- с механическим пуском;
- с комбинированным пуском.

Наибольшее распространение получили генераторы с пуском от электрического и/или теплового сигналов (рис. Б.3).

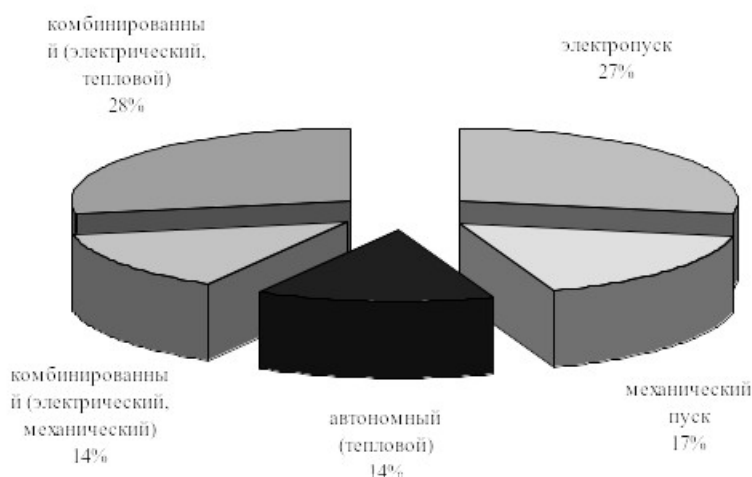


Рис. Б.3. Распределение ГОА по виду инициирующего устройства

Генераторы, имеющие электрический пуск, как правило, применяются в составе автоматических установок аэрозольного пожаротушения. Преимущества данного способа приведения в действие заключаются в возможности организации дистанционного управления установками пожаротушения и периодического контроля целостности цепей запуска.

Тепловой пуск ГОА обычно осуществляется от огнепроводного шнура (термочувствительного) на основе специальной твердотопливной композиции с пониженной температурой самовоспламенения. Из нее

изготавливается шнур с заданными формой и размерами. Огнепроводный термочувствительный шнур размещают в местах наиболее вероятного возникновения загорания в защищаемом помещении. При возникновении пожара он самовоспламеняется, огневой импульс с большой скоростью распространяется по шнуру и приводит в действие генератор. Возможно также воспламенение огнепроводного шнура от специальных пиромеханических устройств, срабатывающих при достижении в контролируемой зоне защищаемого помещения заданной температуры, как правило, более низкой, чем температура самовоспламенения огнепроводного шнура. ГОА с таким способом пуска не требуют внешнего источника энергии, функционируют автономно и применяются в стационарных установках пожаротушения, а также переносных (забрасываемых) генераторах. Недостатком рассматриваемого способа запуска ГОА является то, что процесс инициирования генератора невозможно проконтролировать, а соответственно предотвратить несанкционированное срабатывание установки аэрозольного пожаротушения.

Для стационарно размещаемых ГОА, важной характеристикой, которая должна приводиться в технической документации на генератор, является радиус высокотемпературной зоны, которая образуется при срабатывании ГОА. Величина этой зоны в первую очередь зависит от температуры получаемого огнетушащего вещества.

В зависимости от температуры аэрозоля, получаемого на срезе выходного отверстия, ГОА подразделяют на три типа:

- I – высокотемпературные (температура аэрозоля $>500\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- II – среднетемпературные (температура аэрозоля $200\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- III – низкотемпературные (температура аэрозоля $<200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Очевидно, что среди существующих модификаций ГОА преобладают устройства создающие аэрозоль с температурой ниже $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Хотя такая температура огнетушащего вещества остается достаточно высокой и

горячий аэрозоль в течение определенного промежутка времени находится в верхней части защищаемого помещения длительность процесса остывания аэрозоля составляет всего несколько минут.

В последнее время наметилась тенденция к снижению температуры аэрозоля, об этом свидетельствует тот факт, что четвертая часть выпускаемых генераторов имеет на выходе аэрозоль с температурой менее 200 °С (рис. Б.4). Решается эта проблема путем применения теплопоглощающих и охлаждающих насадков.

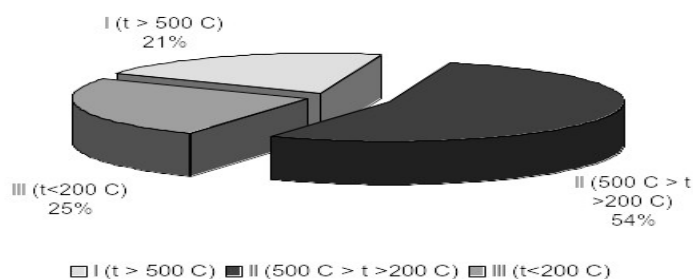


Рис. Б.4. Распределение ГОА по температуре аэрозоля

Выпускаемые на сегодняшний день генераторы по виду охлаждающего устройства можно классифицировать следующим образом (рис. Б.5):

- с химическим охладителем;
- с газодинамическим охладителем;
- без охладителя.

Химический способ охлаждения в существующих устройствах реализован в бесконтактном и контактном режимах. Бесконтактный режим охлаждения, используется только в генераторах серии "ГАБАР". Он характеризуется тем, что высокотемпературные продукты горения заряда АОС проходят через лабиринт каналов, состоящих из двойных стенок, между которыми в качестве охладителя засыпан обычный огнетушащий

порошок. За счет нагрева стенок канала порошок частично разлагается и выделяет дополнительное количество инертных газов в поток аэрозоля, а частично остается в неразложившемся виде. Такой способ позволяет понизить температуру аэрозоля до 200°C без уменьшения его огнетушащей эффективности.

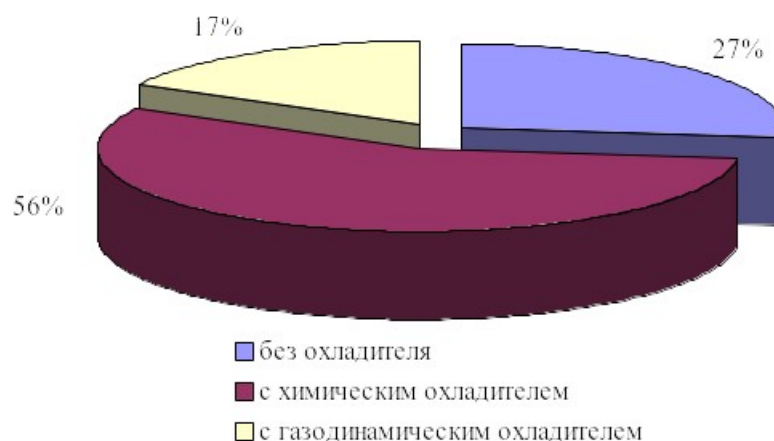


Рис. Б.5. Распределение ГОА по типу охладителя

Контактный режим охлаждения заключается в том, что на пути раскаленных продуктов разложения АОС устанавливается дополнительная насадка, заполненная пористым охладителем, чаще всего на основе оксалатов. Происходит прямой контакт аэрозоля и охладителя, который разлагается с эндотермическим эффектом, охлаждая его и выделяя при этом дополнительное количество инертных газов. В зависимости от конструкции насадки и физико-химических свойств охладителя этот способ позволяет снизить температуру огнетушащего аэрозоля до 200-400°C. Вместе с тем следует иметь в виду, что при интенсивном охлаждении продуктов горения происходит конденсация хлорида и карбоната калия, а при резком снижении скорости огнетушащего вещества в насадке конденсированная фаза успевает коагулироваться в более крупные конгломераты. При этом часть конденсированной составляющей аэрозоля фильтруется охладителем, а часть выносится газовым потоком, в

результате чего огнетушащая эффективность охлажденного аэрозоля снижается примерно в 2-2.5 раза.

Газодинамический способ охлаждения, реализованный в изделиях серии "СОТ", его использует только московская фирма "Гранит-Саламандра". Практика применения генераторов "СОТ-1" показала, что при выпуске высокотемпературного аэрозоля через такую насадку происходит подсасывание воздуха и вместо охлаждения происходит догорание в газовом потоке недоокисленных СО и H_2 с образованием высокотемпературного диффузионного пламени, длина которого достигала 1,5-2 м. На сегодняшний день генератор данной марки запрещен к эксплуатации, а газодинамические насадки используются на некоторых модификациях генераторов серии "АГС" в комбинации с химическим способом охлаждения.

Необходимо отметить, что использование охлаждающих насадков, как правило, приводит к ухудшению показателей ГОА, таких как удельная массовая эффективность: отношение массы снаряженного ГОА к объему защищаемого помещения. Анализ данных (табл. Б.2) показывает, что существенный вклад в этот процесс вносит масса охлаждающего насадка.

Снижение температуры аэрозоля на выходе ГОА можно добиться путем применения зарядов АОС с низкой температурой горения, так называемые генераторы "холодного" аэрозоля (см. рис. Б.1). К ним относятся генераторы серии "ОСА-М" (ООО "Озон" г. Пермь), ГОА 40-72 (фирма "Интертехнолог" г. Санкт-Петербург). Снижение температуры аэрозоля достигается за счет изменения химического состава зарядов АОС. Но в этом случае ухудшается огнетушащая способность аэрозоля, что в свою очередь приводит к увеличению массы заряда и массы самого генератора.

Одной из основных характеристик любого ГОА есть закон изменения во времени расхода огнетушащего аэрозоля. Можно выделить следующие основные режимы подачи аэрозоля:

- подача аэрозоля с постоянным секундным расходом;
- прогрессивное
- регрессивное.

Таблица Б.2

Основные технические характеристики ГОА стационарного применения

№ п/п	Марка ГОА	Характеристики ГОА					
		защищае- мый объем, м ³	масса ГОА, кг	масса заряда АОС, кг	время работы, с	габаритные размеры	
						диаметр, мм	длина, мм
1.	ПУРГА–1М	10	0,8	0,55	20–35	72	120
2.	ПУРГА–М	8	2,4	0,6	10–14	102	390
3.	ПУРГА МХ	10	9,3	1,0	45	100	623
4.	ПУРГА К002	0,25	0,1	0,02	10	28	120
5.	ПУРГА К–02	2	1,04	0,02	20–26	88	116
6.	ПУРГА Т	0,1	0,017	0,008	5	52	14
7.	ПАГ–02	4	0,64	0,2	6–8	80	90
8.	ПАГ–04	8	1,1	0,4	6–8	80	120
9.	ПАГ-06	7,0–10,0	1,6	0,6	15	80	144
10.	АГС–3	3,2	1,2	0,32	19	122	65
11.	ГОА–15–20	0,3	1,2	–	10	32	455
12.	ГОА–15–30	0,5	1,6	–	10	32	630
13.	МАГ 1	0.5 - 1	0,45	0,06	2–3	75	97
14.	МАГ 2	1 - 2	0,55	0,1	4–6	75	108
15.	МАГ 02	0,2	0,12	0,02	2–3	28	125
16.	МАГ 3/МАГ 3Г	2 - 3	0,90	0,2	4–6	75	150
17.	МАГ 4	10	3,8	1,0	7–10	95	385
18.	МАГ 5	5	2,1	0,5	5–10	95	232

19.	Допинг–2.02	0,2	0,15	0,016	5	70	40
20.	Допинг–2	2,0	1,3	0,2	25	80	160
21.	Допинг–2.10	10	3,9	1,2	20	105	320
22.	Вьюга МЭО 075	0,8	0,34	0,075	6	45	200

Как показывает проведенный анализ (рис. Б.6), среди промышленно выпускаемых генераторов преобладают устройства с нейтральным законом изменения массового расхода. Этот режим реализуется в зарядах без канала и горящих по торцу, либо в канальных зарядах горящих по внутренней и внешней поверхности заряда.

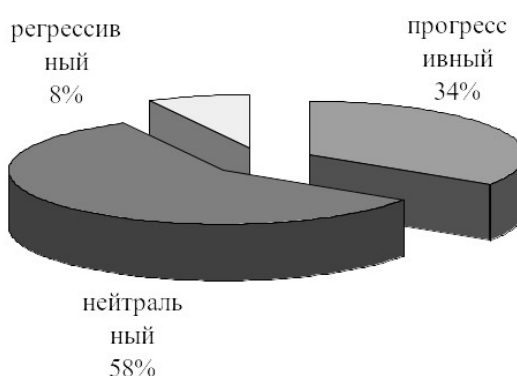


Рис. Б.6. Распределение ГОА по закону изменения расхода

Режим работы с постоянными во времени расходными характеристиками лучше всего поддается моделированию и используется в расчетах при прогнозировании параметров генератора. Кроме этого, канальный заряд, горящий по всей поверхности, обеспечивает максимальный расход огнетушащего вещества и минимальное время работы ГОА. Поэтому при проектировании новых устройств разработчиками отдается предпочтение именно нейтральному закону изменения расхода.

Проведенный анализ показал, что основными техническими характеристиками ГОА, которые должны учитываться при проектировании систем аэрозольного пожаротушения и создании новых

модификаций ГОА, а также должны быть приведены в паспорте на устройство, являются следующие показатели: время работы ГОА, его инерционность, масса заряда АОС, огнетушащая способность получаемого аэрозоля, масса снаряженного генератора, радиус высокотемпературных зон, закон изменения расходных характеристик, вид инициирующего устройства, габаритные размеры, условия эксплуатации.

Приложение В

Результаты имитационного моделирования характеристик ГОА

Таблица В.3.1

Уровни варьирования факторов (модель для определения длительности переходного процесса в камере ГОА)

Факторы	Кодовое	Нулевой	Интервал	Максимальный	Минимальный
Плотность аэрозолеобразующего заряда, ρ_T , кг / м ³	x_1	1800	300	2100	1500
Высота свободного объема над шашкой заряда, h, см	x_2	4	1.25	5.25	2.75
Скорость горения заряда при атмосферном давлении, u_a , мм/с	x_3	1.2	0.3	1.5	0.9
Отношение площади поверхности горения к площади выпускных отверстий	x_4	10	3	13	7

Таблица В.3.3

Результаты расчетов для проверки гипотезы о значимости квадратичных членов модели

$\widetilde{b}_0$	286.38
$\bar{t}_{пп}$	266.7
$ \bar{t}_{пп} - \widetilde{b}_0 $	19.7
$s_{ц.п.}^2$	122.9
$t_{скр} \cdot s_{ц.п.}^2 \sqrt{\frac{n_0 + N}{n \cdot N}}$	11.37

Таблица В.3.4

Значения оценок коэффициентов уравнения регрессии

Обозначение оценки коэффициента	Значение
b_0	266.7
b_1	45.33
b_2	87.17
b_3	68.08
b_4	156.17
b_{12}	14.5
b_{13}	10.88
b_{14}	24.88
b_{23}	21.75
b_{24}	48.75
b_{34}	37.63

b_{11}	-0.7
b_{22}	-0.58
b_{33}	-1.08
b_{44}	22.05

Таблица В.3.5

Результаты проверки адекватности модели

$S_{ад}^2$	11912
$\varphi_{ад}$	26
S_y^2	737
$f_{ц.п.}$	6
$F_{ад}$	3.73
$F_{кр}$	3.84

Таблица В.3.6

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии

Коэффициенты регрессии	Оценка $b_{кр_i}$	Вывод
b_0	10.27	Значим
b_i	5.55	Все значимы
$b_{i,j}$	6.8	Все значимы
b_{ii}	4.8	Все незначимы, кроме коэффициента b_{44}

Таблица В.3.7

Уровни варьирования факторов (модель для определения времени работы ГОА)

Факторы	Кодовое	Нулевой уровень	Интервал	Максимальный	Минимальный	Величина плеча для звездных точек	
						$x_i=+2$	$x_i=-2$
Плотность аэрозолеобразующего заряда, ρ_T , кг/м ³	x_1	1800	600	2400	1200	3000	600
Длина шашки заряда, L, см	x_2	8	1.25	9.25	6.75	10	6

Скорость горения заряда при атмосферном давлении, u_a , мм/с	x_3	1.0	0.15	1.15	0.85	1.3	0.7
Начальная температура заряда, T_H , К	x_4	273	25	298	248	358	198
Отношение площади поверхности горения к площади выпускных отверстий, ψ	x_5	16	7	23	9	30	2

Таблица В.3.8

Рототабельный центральный композиционный униформ-план 2^{5-1}

[illegible]

Продолжение табл. В.3.8

[illegible]

Таблица В.3.9

Значения оценок коэффициентов уравнения регрессии

Обозначение оценки коэффициента	Значение	Критическое значение	Вывод
b_0	60.644	0.5	Значим
b_1	– 0.3	0.253	Значим
b_2	7.63		Значим
b_3	– 9.61		Значим
b_4	– 2.48		Значим
b_5	– 0.38		Значим
b_{12}	– 0.042	0.31	Незначим
b_{13}	– 0.049		Незначим
b_{14}	– 0.021		Незначим
b_{15}	– 0.187		Незначим
b_{23}	– 1.18		Значим
b_{24}	– 0.35		Значим
b_{25}	0.052		Незначим
b_{34}	0.34		Значим
b_{35}	– 0.059		Незначим
b_{45}	– 0.021		Незначим
b_{11}	– 0.157	0.22	Незначим
b_{22}	– 0.114		Незначим
b_{33}	1.385		Значим
b_{44}	– 0.066		Незначим
b_{55}	– 0.19		Незначим

Таблица В.3.10

Уровни варьирования факторов (модель для определения массового расхода ГОА)

Факторы	Кодовое	Нулевой уровень $x_i = 0$	Интервал варьирования	Максимальный уровень $x_i = 1$	Минимальный уровень $x_i = -1$
Плотность аэрозолеобразующего заряда, ρ_T , кг · м ⁻³	x_1	1800	600	2400	1200
Площадь поверхности горения заряда S_3 , см ²	x_2	314	137.4	451.6	176.7
Скорость горения заряда при атмосферном давлении, u_a , мм/с	x_3	1.0	0.15	1.15	0.85
Начальная температура заряда, T_H , К	x_4	278	40	318	238

Таблица В.3.11

Расширенная матрица планирования полного факторного эксперимента
типа 2^4 и результаты опытов.

Опыт	№ п/п	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	M, г/с
Планирование типа 2^4	64	+	—	—	—	—	+	+	+	+	+	+	22.88
	65	+	+	—	—	—	—	—	—	+	+	+	45.85
	66	+	—	+	—	—	—	+	+	—	—	+	58.68
	67	+	+	+	—	—	+	—	—	—	—	+	118.8
	68	+	—	—	+	—	+	—	+	—	+	—	30.97
	69	+	+	—	+	—	—	+	—	—	+	—	62.16
	70	+	—	+	+	—	—	—	+	+	—	—	79.65
	71	+	+	+	+	—	+	+	—	+	—	—	162.9
	72	+	—	—	—	+	+	+	—	+	—	—	24.79
	73	+	+	—	—	+	—	—	+	+	—	—	49.69
	74	+	—	+	—	+	—	+	—	—	+	—	63.61
	75	+	+	+	—	+	+	—	+	—	+	—	129.1
	76	+	—	—	+	+	+	—	—	—	—	+	33.56
	77	+	+	—	+	+	—	+	+	—	—	+	67.39
	78	+	—	+	+	+	—	—	—	+	+	+	86.4
	79	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	177.4

Таблица В.3.12

Результаты опытов в центре плана

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7
M _{ц.п.} , г/с	74.88	76.05	74.88	75.52	75.75	75.18	76.05

Приложение Г

Результаты экспериментального исследования характеристик генераторов огнетушащего аэрозоля

Таблица Г.4.1

Характеристики опытных образцов ГОА

№ п/п	Марка генератора	Характеристика генератора		
		Масса ГОА, кг / масса заряда АОС, кг	Габаритные размеры, диаметр × длина, мм	Защищаемый объем услов- но герметич- ного помеще- ния, м ³
1.	АГС–2	4.8 / 1.6	∅167 × 152	52
2.	СОТ–1У	5.8 / 3.3	∅178 × 357	60

Таблица Г.4.2

Результаты определения длительности переходного процесса для генератора марки СОТ–1У

Т _{Н_і} , °С	Длительность переходного процесса							СКО σ _{ПП_{им}} , мкс
	t̄ _{ПП_і} , мс	Результат эксперимента						
		1	2	3	4	5	6	
– 50	6.496	6.429	6.615	6.453	6.416	6.415	6.648	106.3
– 25	6.354	6.296	6.458	6.381	6.448	6.256	6.283	87.66
0	6.188	6.145	6.112	6.117	6.207	6.231	6.316	79.17
+ 25	6.082	6.065	6.15	6.083	5.99	6.01	6.196	79.25
+ 50	5.936	5.857	5.865	5.916	6.001	5.933	6.042	73.76

Таблица Г.4.3

Результаты определения длительности переходного процесса для генератора марки АГС–2

Т _{Н_і} , °С	Длительность переходного процесса							СКО σ _{ПП_{і_м}} , мкс
	t̄ _{ПП_і} , мс	Результат эксперимента						
		1	2	3	4	5	6	
– 50	6.833	6.976	6.709	6.746	6.784	6.945	6.839	108.1
– 25	6.701	6.63	6.771	6.803	6.634	6.633	6.735	78.31
0	6.595	6.497	6.647	6.626	6.554	6.639	6.61	58.46
+ 25	6.402	6.411	6.343	6.351	6.442	6.387	6.478	52.42
+ 50	6.327	6.327	6.247	6.298	6.375	6.343	6.299	55.49

Таблица Г.4.4

Результаты определения времени работы генератора марки СОТ–1У

$T_{H_i}, ^\circ\text{C}$	Время работы генератора							СКО $\sigma_{p_{im}}, \text{с}$
	$\bar{t}_{p_i}, \text{с}$	Результат эксперимента						
		1	2	3	4	5	6	
+ 50	73.5693	72.5238	73.0922	74.2516	73.5569	74.9556	73.0354	0.89368
+ 25	79.6591	80.6736	79.3728	78.6925	78.8714	81.5632	78.7811	1.18849
0	85.3214	84.3107	86.1089	86.3501	84.8519	85.8307	84.4763	0.88249
− 25	92.697	93.0426	92.0731	93.3836	93.6777	92.1448	91.8604	0.767673
− 50	98.8862	99.4199	99.0963	99.9474	98.4371	97.0836	99.3333	1.01058

Таблица Г.4.5

Результаты определения времени работы генератора марки АГС–2

$T_{H_i},\text{ }^{\circ}\text{C}$	Время работы генератора							СКО $\sigma_{pim},\text{с}$
	$\bar{t}_{pi},\text{ с}$	Результат эксперимента						
		1	2	3	4	5	6	
+ 50	36.7846	36.2619	36.5461	37.1258	36.7785	37.4778	36.5177	0.44684
+ 25	39.8295	40.3368	39.6864	39.3463	39.4357	40.7816	39.3905	0.594247
0	42.6607	42.1553	43.0545	43.175	42.4259	42.9154	42.2381	0.441245
− 25	46.3485	46.5213	46.0366	46.6918	46.8389	46.0724	45.9302	0.383836
− 50	49.4431	49.71	49.5481	49.9737	49.2185	48.5418	49.6666	0.505288

Таблица Г.4.6.

Время работы генераторов по результатам расчетов

Марка генератора	Время работы генератора, с				
	$T_H = -50, ^\circ\text{C}$	$T_H = -25, ^\circ\text{C}$	$T_H = 0, ^\circ\text{C}$	$T_H = 25, ^\circ\text{C}$	$T_H = 50, ^\circ\text{C}$
СОТ–1У	94.504	92.135	89.823	87.568	85.368
АГС–2	47.592	46.397	45.229	44.09	42.979

Таблица Г.4.7

Результаты определения скорости горения заряда
в генераторе марки СОТ–1У

$T_{H_i},\text{ }^{\circ}\text{C}$	Скорость горения заряда генератора							СКО $\sigma_{u_{im}},$
	$\overline{u}_i,$ мм/с	Результат эксперимента						
		1	2	3	4	5	6	мм/с
+ 50	1.631	1.655	1.642	1.616	1.631	1.601	1.643	0.0197
+ 25	1.507	1.487	1.512	1.525	1.521	1.471	1.523	0.0223
0	1.407	1.423	1.394	1.39	1.414	1.398	1.421	0.0146
− 25	1.295	1.29	1.303	1.285	1.281	1.302	1.306	0.0107
− 50	1.214	1.207	1.211	1.201	1.219	1.236	1.208	0.0125

Таблица Г.4.8

Результаты определения скорости горения заряда
в генераторе марки АГС–2

$T_{H_i},\text{ }^{\circ}\text{C}$	Скорость горения заряда генератора							СКО
	$\overline{u}_i,$ мм/с	Результат эксперимента						$\sigma_{u_{im}},$
		1	2	3	4	5	6	мм/с
+ 50	1.63132	1.65463	1.64176	1.61613	1.63139	1.60095	1.64304	0.0197131
+ 25	1.5067	1.48748	1.51185	1.52492	1.52146	1.47125	1.52321	0.0222501
0	1.40657	1.42331	1.39358	1.38969	1.41423	1.3981	1.42052	0.0145502
− 25	1.29461	1.28973	1.30331	1.28502	1.28099	1.3023	1.30633	0.0107094
− 50	1.21362	1.207	1.21094	1.20063	1.21905	1.23605	1.20805	0.0125157

Приложение Д
Акты внедрения

Копия

"УТВЕРЖДАЮ"

Генеральный директор

ООО НПФ "БРАНД МАСТЕР"

(подпись) П.А. Андрейченко

(печать)

“ 17 “ августа 2004 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Бондаренко
Сергея Николаевича

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Бондаренко С.Н. в виде:

- комплекса математических моделей, описывающих процессы протекающие в генераторе огнетушащего аэрозоля;
- программ для расчета на ЭВМ основных параметров и характеристик генератора огнетушащего аэрозоля с улучшенными характеристиками;
- методики проведения экспериментальных исследований технических характеристик генераторов огнетушащего аэрозоля;
- рекомендаций по проектированию модификаций генераторов огнетушащего аэрозоля с усовершенствованными характеристиками

внедрены в научно-производственной фирме "БРАНД МАСТЕР" при разработке и исследовании новых образцов генераторов огнетушащего аэрозоля. Это позволило разрабатывать новые модификации генераторов огнетушащего аэрозоля и оптимизировать характеристики систем аэрозольного тушения создаваемых для защиты различного рода объектов.

Положительный эффект от результатов внедрения достигается за счет улучшения характеристик системы аэрозольного пожаротушения, путем сокращения времени создания необходимой огнетушащей концентрации в защищаемом объеме на 40 %.

Настоящий акт не является основанием для получения премий и других вознаграждений из фондов предприятия.

Акт составлен для представления в специализированный ученый совет, в связи с защитой диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Технический директор
ООО НПФ "БРАНД МАСТЕР"

(подпись)

А.Г. Котов

Копия верна.

Ученый секретарь АГЗУ,
доктор технических наук, профессор

В.И. Кривцова

Копия

"УТВЕРЖДАЮ"

Генеральный директор

ООО "КРАЙЗ"

А.П. Мищенко

“ “ _____ 2004 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Бондаренко

Сергея Николаевича

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Бондаренко С.Н. в виде:

- комплекса математических моделей рабочих процессов, которые протекают в генераторе огнетушащего аэрозоля;
- аналитических выражений для определения времени работы генератора огнетушащего аэрозоля;
- комплекса прикладных программ для расчета основных параметров и характеристик генератора огнетушащего аэрозоля с улучшенными характеристиками;
- рекомендаций по выбору параметров огнетушащего заряда, которые обеспечивают минимальное время работы генератора при заданном расходе

внедрены на предприятии ООО "КРАЙЗ" при исследовании и выборе новых образцов генераторов огнетушащего аэрозоля, применяемых в

системах объемного тушения. Это позволило улучшить характеристики систем аэрозольного тушения создаваемых на основе усовершенствованных генераторов для защиты различного рода объектов. Положительный эффект от результатов внедрения достигается за счет улучшения характеристик системы аэрозольного пожаротушения, путем сокращения времени тушения пожара в замкнутом объеме на 40 %.

Настоящий акт не является основанием для получения премий и других вознаграждений из фондов предприятия.

Акт составлен для представления в специализированный ученый совет, в связи с защитой диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Главный инженер
ООО "КРАЙЗ"

В.П. Руденко

Копия верна.

Ученый секретарь АГЗУ,
доктор технических наук, профессор

В.И. Кривцова

Копия

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор

ПИ "ЭЛЕКТРОПРОМ"

Н.И. Усатый

“ “ _____ 2004 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Бондаренко
Сергея Николаевича

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Бондаренко С.Н. в виде:

- результатов анализа особенностей построения современных систем объемного пожаротушения;
- комплекса динамических моделей генератора огнетушащего аэрозоля с усовершенствованными характеристиками;
- результатов анализа конструктивных особенностей существующих модификаций генераторов огнетушащего аэрозоля;
- рекомендаций по проектированию модификаций генераторов огнетушащего аэрозоля с усовершенствованными характеристиками и систем объемного пожаротушения на их основе

внедрены в проектном институте "Электропром" при разработке систем объемного пожаротушения на базе новых образцов генераторов огнетушащего аэрозоля. Это позволило оптимизировать характеристики

систем аэрозольного тушения создаваемых для защиты различного рода объектов. Положительный эффект от результатов внедрения достигается вследствие сокращения времени на обоснование и выбор состава системы объемного тушения.

Настоящий акт не является основанием для получения премий и других вознаграждений из фондов предприятия.

Акт составлен для представления в специализированный ученый совет, в связи с защитой диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Исполнительный директор
ПИ "ЭЛЕКТРОПРОМ"

Л.Г. Рохман

Главный специалист
ПИ "ЭЛЕКТРОПРОМ"

Л.Г. Левина

Копия верна.

Ученый секретарь АГЗУ,
доктор технических наук, профессор

В.И. Кривцова

Копия

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

проректор з навчальної

та методичної роботи

Академії цивільного захисту України,

кандидат технічних наук, доцент

(підпис)

М.М. Кулешов

(печатка)

“ “ _____ 2004 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Бондаренка Сергія Миколайовича

Комісія в складі: голови — начальника кафедри пожежної автоматики та зв'язку АЦЗУ, к.т.н., доцент Дерев'янка О.А. і членів комісії — доцента кафедри, к.т.н., доцента Чуба І.А. і старшого викладача кафедри Винокурова Г.Е. склала даний акт про те, що результати дисертаційних досліджень Бондаренка С.М. у вигляді:

- комплексу математичних моделей, які описують процеси, що відбуваються під час роботи генератора вогнегасячого аерозолі;
- динамічних характеристик камери згоряння генератора вогнегасячого аерозолі;
- комп'ютерної програми з прогнозування технічних характеристик генератора вогнегасячого аерозолі за зміною енергетичних параметрів заряду аерозолеутворюючої сполуки

впроваджені в навчальний процес Академії цивільного захисту України при вивченні дисциплін „Пожежна і виробнича автоматика" (Розділ І,

Тема 1 "Теоретичні основи пожежної автоматики") та „Засоби автоматичного протипожежного захисту” (Розділ I, тема 1 „Автоматичні установки пожежогасіння”).

Це дозволило підвищити ефективність навчального процесу шляхом наочної демонстрації практичного застосування аналітичних методів дослідження динамічних характеристик систем пожежної автоматики.

Даний акт не є підставою для одержання премій та інших винагород із фондів Академії цивільного захисту України.

Акт складений для представлення в спеціалізовану вчену раду в зв'язку з захистом дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук.

Голова комісії:
начальник кафедри пожежної
автоматики та зв'язку,
к.т.н., доцент

(підпис)

О.А. Дерев'янку

Члени комісії:
доцент кафедри пожежної
автоматики та зв'язку,
к.т.н., доцент

(підпис)

І.А. Чуб

старший викладач кафедри пожежної
автоматики та зв'язку

(підпис)

Г.Е. Винокуров

Копія верна.

Учений секретар АГЗУ,
доктор технических наук, профессор

В.И. Кривцова