

**Министерство Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий**

**Академия Государственной противопожарной службы**

На правах рукописи



**Ищенко Андрей Дмитриевич**

**ТЕОРИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРОВ  
В ЗДАНИЯХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ**

Специальность: 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»  
(отрасль энергетика, технические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук, профессор  
Алешков Михаил Владимирович

Москва – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ .....	20
1.1 Специфика пожаров объектов энергетики и дислокации сил пожарной охраны .....	20
1.2 Проблематика тушения пожаров объектов энергетики .....	45
1.2.1 Обеспечение электробезопасности участников тушения пожара.....	51
1.2.2 Защита участников тушения от воздействия опасных факторов пожара .....	53
1.2.3 Обеспечение доступа к очагу пожара .....	55
1.2.4 Обеспечение огнетушащими веществами .....	59
1.3 Научные проблемы моделирования тушения пожаров объектов энергетики..	70
1.4 Концепция, цель и задачи исследования .....	78
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ.....	83
2.1 Сравнительное моделирование сложности тушения пожаров в зданиях объектов энергетики .....	83
2.2 Моделирование процесса локализации пожара в зданиях объектов энергетики при воздействии опасных факторов на участников тушения пожара .....	96
2.3 Теоретические основы и технология повышения тактико-технических возможностей пожарной техники для локализации пожаров в зданиях объектов энергетики .....	108
2.4 Теоретические основы локализации пожаров в зданиях объектов энергетики .....	118
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОСОБОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ УЧАСТНИКОВ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ ОТ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА.....	130
3.1 Способы снижения воздействия опасных факторов пожара на участников тушения пожаров объектов энергетики .....	130

3.2 Исследование возможности улучшения основных параметров средств защиты участников тушения пожаров объектов энергетики .....	142
3.3 Моделирование повышения ресурса средств индивидуальной защиты органов дыхания участников тушения пожаров от опасных факторов .....	160
3.3.1 Способ и модель увеличения удельного времени защитного действия регенеративных дыхательных аппаратов на сжатом кислороде .....	161
3.3.2 Способ и модель увеличения удельного времени защитного действия резервуарных дыхательных аппаратов с открытой схемой дыхания .....	167
3.4 Экспериментальная оценка увеличения ресурса средств индивидуальной защиты органов дыхания для тушения пожаров в зданиях объектов энергетики .....	182
3.5 Разработка прототипа комплекса технических средств обеспечения работ в непригодной для дыхания среде при тушении пожаров в зданиях объектов энергетики .....	192
ГЛАВА 4 ОСНОВЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ В НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ИХ РАЗВИТИЯ .....	205
4.1 Научные основы и моделирование жизнеобеспечения персонала в зданиях объекта энергетики при воздействии опасных факторов пожара .....	205
4.2 Прогнозирование временных показателей действий подразделений пожарной охраны при возникновении пожара на объекте энергетики .....	224
4.3 Методы обеспечения готовности персонала объектов энергетики и пожарных к действиям в условиях воздействия опасных факторов пожара .....	235
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗВИВШИХСЯ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ .....	251
5.1 Научные основы и моделирование тактико-технических возможностей мобильных средств пожаротушения .....	251
5.2 Способы и средства повышения тактических возможностей пожарных за счет улучшения видимости при пожарах в зданиях объектов энергетики .....	272

5.2.1 Применение методов и средств дымоудаления .....	277
5.2.2 Разработка способов, устройств и приемов дымоосаждения.....	281
5.3 Исследование локализации пожаров в зданиях объектов энергетики объемным способом от мобильных средств пожаротушения .....	303
5.3.1 Исследование локализации пожаров объемным способом в комплексе помещений от мобильных средств пожаротушения .....	304
5.3.2 Исследование локализации пожаров объемным способом в протяженном тоннеле от мобильных средств пожаротушения.....	308
5.3.3 Исследование локализации пожаров объемным способом в кабельном коллекторе зигзагообразной формы от мобильных средств пожаротушения .....	314
ГЛАВА 6 КОНЦЕПЦИЯ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ С УЧЕТОМ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ .....	322
6.1 Метод локализации пожаров в зданиях объектов энергетики .....	322
6.2 Методика оценки достаточности сил и средств для локализации пожаров в зданиях объектов энергетики .....	340
6.3 Концепция достаточности и предложения по составу сил и комплексу средств для локализации пожаров в зданиях объектов энергетики.....	358
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	367
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	371
Приложение А Акты внедрения .....	403
Приложение Б Патенты Российской Федерации, свидетельства о регистрации программ для электронно-вычислительных машин.....	417



## Перечень сокращений

- АЭС – атомная электростанция;
- ВЗД – время защитного действия;
- ГДЗС – газодымозащитная служба;
- ГЖ – горючая жидкость;
- ГРЭС – государственная районная электрическая станция;
- ГЭС – гидроэлектростанция;
- ДА – дыхательный аппарат;
- ДАСВ – дыхательный аппарат со сжатым воздухом;
- ДАСК – дыхательный аппарат со сжатым кислородом;
- ДЭС – дизельная электростанция;
- ЛВЖ – легковоспламеняющаяся жидкость;
- НДС – непригодная для дыхания среда;
- ОТВ – огнетушащее вещество;
- ОФП – опасные факторы пожара;
- ПБ – пожарная безопасность;
- ПО – пожарная охрана;
- ППО – подразделение пожарной охраны;
- ПТП – план тушения пожара;
- РТП – руководитель тушения пожара;
- СЗО ИТ – специальная защитная одежда изолирующего типа;
- СИЗОД – средство индивидуальной защиты органов дыхания;
- СЧС ПО – силы и средства пожарной охраны;
- СОПБ – система обеспечения пожарной безопасности;
- ТЭС – тепловая электрическая станция;
- ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;
- ЧС – чрезвычайная ситуация.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Возникновение нештатной ситуации на отдельном объекте энергетики может привести к аварийной работе заметной части энергетического сектора в целом. Данный сектор представляет собой связанную сложную структуру, которая производит различные виды энергии и транспортирует ее до потребителя. Особую опасность представляют атомные электростанции (АЭС). Пожар на АЭС, если он своевременно не локализован, может иметь катастрофические последствия. Аварии, произошедшие на Чернобыльской АЭС и на АЭС «Фукусима-1», известны всему миру.

Сложность пожаров объектов энергетики характеризуется наличием большого количества электрооборудования под высоким напряжением, а также горючей нагрузки в виде турбинного и трансформаторного масел, электроизоляции. Крупные пожары на объектах энергетики чаще происходят в холодное время года, что обусловлено повышенной рабочей нагрузкой. Количество пожаров объектов энергетики в нашей стране в целом уменьшается, в то же время прямой ущерб растет. Общий материальный ущерб на объектах энергетики в значительной мере формируется от последствий крупных пожаров. Следует отметить, что косвенный ущерб, как правило, имеет более значимый размер. В случае пожара приходится останавливать процесс производства энергии и перераспределять мощности, что приводит к повышенной нагрузке и может спровоцировать системную аварию, переходящую в чрезвычайную ситуацию (ЧС), которая может носить и социальный характер, выраженный в нарушении жизнеобеспечения населения и работоспособности объектов.

Анализ статистических данных показывает, что в последние два десятилетия наблюдается рост числа крупных аварий и пожаров со значительным ущербом на объектах энергетической отрасли. В Российской Федерации находится порядка пятисот крупных объектов энергетики. Они рассредоточены по всей территории страны и имеются в каждом пожарно-спасательном гарнизоне (ПСГ). Закономерно, что объекты энергетики в силу своих значительных размеров должны находиться на

территории, охраняемой более крупными пожарно-спасательными силами. Однако и из этого общего правила имеются исключения, связанные с удалением значимых для энергетики страны объектов, таких как АЭС и ГЭС, от крупных населенных пунктов. Характер организации тушения пожаров (ТП) на них отличается от пожаротушения на объектах энергетики, расположенных в крупных населенных пунктах, где в течение короткого времени могут быть сосредоточены значительные силы и средства пожарной охраны (СЧС ПО).

Чтобы не допустить перерастания пожара или аварии на объекте энергетики в ЧС социально-экономического характера в зоне, которую обеспечивает энергией данный объект энергетики, наряду с превентивными мерами следует организовать тушение возможного пожара таким образом, чтобы минимизировать его влияние на процесс выработки энергии. Снижения последствий пожара на объекте энергетики целесообразно достигать его своевременной локализацией. Локализация пожара является краеугольным понятием в сфере организации пожаротушения, закрепленным в статье 1 Федерального закона от 24 декабря 1994 года №69-ФЗ «О пожарной безопасности». Под локализацией пожара (ЛП) понимаются действия, направленные на предотвращение возможности дальнейшего распространения горения и создание условий для его ликвидации имеющимися силами и средствами.

Наряду с минимизацией времени начала ТП основополагающим условием для успешной ЛП является непрерывность тушения от момента подачи огнетушащих веществ (ОТВ) до ликвидации пожара. Обеспечение непрерывности тушения подразумевает своевременность сосредоточения необходимых СЧС ПО в количестве, достаточном для ЛП в тех размерах, которые он принял к моменту начала тушения. Это известная аксиома, на которой строится система организации ТП и для объектов энергетики, которая ввиду их особого места в обеспечении благополучия населения, должна соблюдаться в первоочередном порядке.

Непрерывность ТП обеспечивается как бесперебойной подачей ОТВ, так и возможностью пожарных осуществлять ее на протяжении всего времени тушения пожара. Обеспечение подачи ОТВ является основой моделирования ТП практически любого вида объектов. Основным подходом к расчетам является огнетушащая

способность выбранного ОТВ, что оправдано при полном использовании огнетушащей способности. Однако в практике ТП, особенно пожаров в помещениях, использовать огнетушащую способность полностью не представляется возможным из-за того, что опасные факторы пожара (ОФП) препятствуют подаче ОТВ в очаг пожара (на горящие поверхности). Это происходит из-за снижения видимости, влияния высокой температуры и теплового излучения в помещении пожара. Сочетание воздействия нескольких ОФП, как правило, обладает синергетическим эффектом, что делает доступ к зоне горения еще более затруднительным и опасным для участников ТП. Наиболее частым ответом на это сочетание ОФП является увеличение подачи ОТВ в направлении воздействия ОФП (тушение «по дыму»). В таких условиях полнота использования огнетушащей способности сокращается в разы, а в особо сложных случаях – на порядки.

Следовательно, для своевременной ЛП должно быть обеспечено выполнение нескольких условий: наличие и техническая возможность подачи ОТВ в зону горения; тактическая возможность подачи ОТВ; защита участников ТП от ОФП и их сопутствующих проявлений. Выполнение каждого из этих условий влияет на другие, и на исход тушения пожара в целом. Решающей силой в реализации совокупности условий, обеспечивающих своевременную ЛП в помещениях объекта энергетики, являются участники ТП (пожарные и персонал объекта), а их жизнеобеспечение в условиях воздействия ОФП – необходимое условие осуществления процесса ЛП на объекте энергетики.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам, связанным с обеспечением безопасности потенциально опасных и критически важных объектов, посвящено достаточно много работ. Наиболее значимые результаты научных исследований в этой области отражены в работах Брушлинского Н. Н., Воробьева Ю. Л., Болодыяна И. А., Шахраманьяна М. А., Габричидзе Т. Г., Акимова В. А., Гордиенко Д. М., *Frieder K., Marc-Andre, Kies W., Link M, Chen Xing*, и других ученых. Авторы этих работ детально анализировали опасности, характерные для этих объектов, исследовали риски возможных аварий и катастроф.

Непосредственно вопросами обеспечения безопасности объектов энергетической отрасли занимались Микеев А. К., Копылов Н. П., Алешков М. В., Пузач С. В., Цариченко С. Г., Смелков Г. И., Пуцев Д. И., *Drewry D., Dieken D., Coutin M., Plumescocq W., Melis S., Aubouin L, Gay L., Gracia R., Wizenne E.* В работах этих авторов представлены результаты исследований, связанных с оценкой защищенности объектов энергетики с точки зрения распространения ОФП по зданиям, обеспечения подачи ОТВ, в том числе, при сложных метеорологических условиях.

Весьма показателен тот факт, что на фоне снижения числа пожаров на объектах энергетики возрастает применение пожарными средств защиты, обеспечивающих работу в условиях непригодной для дыхания среды (задымления). Обеспечение ЛП объектов энергетики имеет особенностью необходимость сохранения работоспособности объекта и вытекающую из нее необходимость жизнеобеспечения оперативного персонала в условиях пожара. Наибольшую сложность при ТП объектов энергетики создает задымление горящих и смежных с ними помещений. Фактором, лимитирующим нахождение участников ТП в условиях воздействия ОФП, является время защитного действия (ВЗД) средств защиты. Закономерно и оптимально суждение, что оно должно превышать время ТП. Когда же ВЗД средств защиты от ОФП меньше времени ТП, следует принимать дополнительные меры по защите участников ТП от ОФП на все время ТП.

Однако до настоящего времени комплексно не рассматривался вопрос осуществления локализации пожаров во взаимосвязи всех условий, обеспечивающих своевременное тушение пожаров объектов энергетики в зависимости от их расположения относительно СиС ПО. Следует также отметить, что в проводимых ранее исследованиях решались, в основном, частные задачи по выполнению отдельных условий, обеспечивающих ТП без учета их взаимосвязи с особенностями объектов энергетики. Однако задача обеспечения своевременного ТП объектов энергетики с учетом их специфики требует комплексного решения путем рассмотрения взаимосвязи условий, обеспечивающих своевременную ЛП в зданиях.

Анализ состояния решаемой проблемы позволил сформулировать общую

концепцию исследования в виде научно обоснованного решения социально значимой государственной проблемы – минимизации последствий пожаров объектов энергетики, которые могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций социально-экономического характера, связанных с прекращением подачи энергии населенным пунктам, промышленным объектам и объектам инфраструктуры. Для реализации концепции поставлена цель работы и определены основные задачи исследования.

**Цель работы** – разработка теории локализации пожара, направленной на сохранение работоспособности объекта энергетики, и развитие теоретических основ жизнеобеспечения участников тушения пожара в условиях воздействия опасных факторов.

**Основные задачи исследования:**

– выполнить анализ последствий пожаров объектов энергетики с учетом мер обеспечения локализации пожаров и реагирования подразделений пожарной охраны с выявлением факторов, негативно влияющих на сохранение работоспособности объекта энергетики;

– провести на основе математического моделирования сравнительный анализ тушения пожаров объектов энергетики, произвести моделирование обеспечения непрерывного тушения пожара объекта энергетики в условиях воздействия опасных факторов на участников тушения пожара и разработать теоретическую основу локализации пожаров объектов энергетики;

– произвести моделирование способов и совершенствование средств защиты участников тушения пожаров объектов энергетики от опасных факторов пожара и обосновать комплекс технических средств обеспечения работ в непригодной для дыхания среде при тушении пожаров объектов энергетики;

– произвести прогнозное моделирование и разработать теоретические основы жизнеобеспечения персонала в условиях воздействия опасных факторов при возникновении пожара на объекте энергетики, ускорения начала действий подразделений пожарной охраны, усовершенствовать методы обеспечения готовности персонала объектов энергетики и пожарных к действиям по локализации пожара;

– разработать теоретическую основу повышения тактико-технических возможностей пожарных по обеспечению тушения пожаров объектов энергетики, для чего разработать способы и средства улучшения видимости в дыму и исследовать возможность локализации пожаров объектов энергетики объемным способом от мобильных средств пожаротушения;

– обосновать метод локализации пожара объекта энергетики, произвести оценку достаточности сил и средств пожарно-спасательных гарнизонов для локализации пожаров объектов энергетики и на их основе разработать концепцию оптимизации противопожарной защиты объектов энергетики.

**Объектом исследования** являлась локализация пожаров объектов энергетики, направленная на сохранение работоспособности объекта энергетики в случае их возникновения. В качестве **предмета исследования** рассматривались теоретические методы и технические средства локализации пожаров в зданиях объектов энергетики, в том числе, жизнеобеспечение участников тушения пожара.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. На основе анализа влияния масштабов пожаров на работоспособность объектов энергетики и моделирования тушения пожара в условиях воздействия опасных факторов на участников тушения пожара определены наиболее уязвимые элементы системы локализации пожаров объектов энергетики.

2. Предложена теория локализации пожаров объектов энергетики, основанная на моделировании непрерывного тушения пожара объекта энергетики в условиях воздействия опасных факторов на участников тушения пожара, и комплексном тактико-техническом принципе локализации пожара, направленном на сохранение работоспособности объекта энергетики.

3. Разработан, смоделирован и экспериментально подтвержден комплекс мер по снижению воздействия опасных факторов на участников тушения пожаров объектов энергетики, способ увеличения удельного времени защитного действия средств защиты участников тушения пожаров и обоснован прототип комплекса технических средств обеспечения работ в непригодной для дыхания среде при тушении пожаров объектов энергетики.

4. Разработаны и апробированы модели, расширяющие возможности персонала объекта энергетики и подразделений пожарной охраны по ограничению распространения пожара в начальной стадии его развития и повышению уровня готовности участников тушения пожаров объектов энергетики к действиям в условиях влияния на них опасных факторов пожара.

5. Разработана теория, осуществлено моделирование и экспериментально подтверждена возможность повышения тактико-технических возможностей мобильных средств пожаротушения за счет применения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для улучшения видимости в дыму с последующей локализацией пожаров объектов энергетики объемным способом.

6. На основе сопоставления моделей развития и тушения пожара разработана методика оценки достаточности сил и средств для локализации пожара, предложен метод локализации пожара объекта энергетики, позволивший сформировать концепцию оптимизации противопожарной защиты, направленную на сохранение работоспособности объекта энергетики при возникновении пожара.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что доказан принцип установления достаточности сил и средств для своевременной локализации пожара объекта энергетики с учетом сил и средств пожарно-спасательного гарнизона, на основе которого разработан метод локализации пожара объекта энергетики, позволяющий проводить оценку возможности тушения пожара объекта с целью предотвращения развития пожара до размеров, которые могут повлиять на работоспособность объекта энергетики.

**Практическая значимость работы состоит в том, что:**

1. Обоснована комплектация, механизм эксплуатации и доставки средств защиты оперативного персонала объекта энергетики, позволяющие выполнять действия по предотвращению или минимизации воздействия пожара на процесс выработки энергии до прибытия подразделений пожарной охраны.

2. Разработана методика и средства подготовки оперативного персонала, позволяющие поддерживать достаточный уровень готовности к действиям по предотвращению или минимизации воздействия пожара на объект энергетики.



3. Разработан способ увеличения на 20% удельного времени защитного действия средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения участников тушения пожаров объектов энергетики от непригодной для дыхания среды.

4. Разработан прототип комплекса технических средств обеспечения работ в непригодной для дыхания среде при тушении развившихся пожаров объектов энергетики, позволяющий осуществлять непрерывную работу на протяжении времени локализации и последующей ликвидации пожара.

5. Обоснованы технические решения и разработаны соответствующие технические средства, позволяющие улучшить более чем в два раза видимость при пожаре объекта энергетики и получены показатели осаждения дыма водной средой в метастабильном фазовом состоянии в объеме помещений.

6. Показана более чем десятикратная эффективность локализации пожаров объемным способом от мобильных средств пожаротушения и получены показатели прекращения горения характерных для объектов энергетики материалов при подаче водной среды в метастабильном фазовом состоянии в здания объектов энергетики.

7. Разработана компьютерная программа оценки достаточности сил и средств для локализации пожара объекта энергетики и предложения по составу сил и комплексу средств, способных с учетом дислокации подразделений пожарной охраны осуществить локализацию возникающего пожара на объекте энергетики, с целью сохранения его работоспособности при трех-шестикратном снижении расходов на содержание объектового подразделения пожарной охраны.

**Материалы диссертации реализованы при:**

– оценке качества эргономических показателей средств защиты органов дыхания с учетом времени защитного действия (Главное управление Государственной противопожарной службы МВД РФ, г. Москва, 1998 г.);

– подготовке специалистов Московского и Санкт-Петербургского институтов пожарной безопасности МВД РФ, Высшего военно-морского инженерного училища МО РФ в части обеспечения работ в непригодной для дыхания среде при пожарах (г. Москва, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, 1998 г.);

– обосновании и экспериментальной оценке технико-биологического подхода к управлению продолжительностью действий газодымозащитников в условиях перегревания (испытательная пожарная лаборатория Управления Государственной противопожарной службы УВД Смоленской области, 2000 г.);

– разработке опытного образца перспективного дыхательного аппарата со сжатым воздухом ИВА-Р20 с увеличенным временем защитного действия (ОАО «Респиратор», г. Орехово-Зуево, 2005 г.);

– разработке концепции, опытного образца и проведении опытной эксплуатации трансформируемого передвижного огневого тренажера для подготовки газодымозащитников (Главное управление МЧС России по Республике Карелия, г. Петрозаводск, 2005 г.);

– разработке конструкции и проведении полигонных испытаний по экономным способам расходования запаса сжатого воздуха в дыхательных аппаратах (40 ГосНИИ Минобороны России, г. Ломоносов, 2006 г.);

– планировании, проведении и оценке результатов производственного научно-исследовательского эксперимента «Оценка эффективности использования температурно-активированной воды и левитирующей пены для тушения пожаров и ликвидации ЧС, вызванных утечкой или проливом горючих материалов, а также пожарами в кабельных коллекторах» (Оренбургский филиал ВНИИПО МЧС России, г. Оренбург, 2011 г.);

– разработке концепции и технического задания на изготовление технического комплекса обеспечения работ по тушению пожара в непригодной для дыхания среде, позволяющего обеспечить непрерывное тушение пожара (Мытищинский приборостроительный завод, г. Мытищи, 2012 г.);

– выполнении научно-исследовательской работы «Научное обеспечение перспективного развития специализированных пожарных частей по тушению крупных пожаров» (п.1.3-30/Б плана НТД в МЧС России на 2013 год) НИР «СПЧ» (ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха, 2013 г.);

– выполнении научно-исследовательской работы «Научно-методическое обоснование оснащения специализированных пожарно-спасательных частей»

(п. 5.4-7/А5 Плана НИОКР МЧС России на 2014 год и на плановый период 2015 и 2016 годов, утвержденного приказом МЧС России от 27.03.2014 г. № 140) НИР «СПСЧ» (Академия ГПС МЧС России, г. Москва, 2015 г.);

– разработке методических рекомендаций МР 1.3.2.09.1026-2015 «Организация тренировок личного состава объектовых подразделений ФПС по охране АЭС и оперативного персонала АЭС, в том числе совместных, на базе огневых учебно-тренировочных комплексов (полигонов), эксплуатируемых на АЭС» (АО «Концерн Росэнергоатом», г. Москва, 2015 г.);

– разработке инструкции И 1.3.2.15.1111-2016 «Организация защиты оперативного персонала атомных станций при пожарах (авариях) в условиях непригодной для дыхания среды» (АО «Концерн Росэнергоатом», г. Москва, 2016 г.);

– выполнении научно-исследовательской работы «Разработка документа стратегического планирования «Основы государственной политики Российской Федерации в области обеспечения пожарной безопасности на период до 2030 года» НИР «Основы ГП ПБ – 2030» (ЦСИ МЧС России, г. Москва, 2016 г.);

– разработке технических решений, направленных на увеличение времени защитного действия средств индивидуальной защиты органов дыхания пожарных (АО «ПТС», г. Подольск, 2018 г.);

– подготовке оперативного персонала Смоленской АЭС к действиям при возникновении пожара (г. Десногорск, 2018 г.);

– выполнении научно-исследовательской работы «Исследование оперативного реагирования и эффективности действий подразделений пожарной охраны при тушении крупных пожаров и проведении связанных с ним аварийно-спасательных работ» (п. 38 Плана НИОКР МЧС России на 2019 год и на плановый период 2020 и 2021 гг., утвержденного приказом МЧС России от 2 апреля 2019 г. № 195), ВНИИПО МЧС России (г. Балашиха, 2019 г.);

– выполнении научно-исследовательской работы «Исследование деятельности органов управления пожарной охраны по нормированию численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны» (НИР «Нормирование ресурсов ПО», п.5 Плана НИОКР МЧС России на 2019 год и на плановый период

2020 и 2021 годов, утвержденного приказом МЧС России от 2 апреля 2019 г. №195) (ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха, 2019 г.);

– в процессе расчета сил и средств подразделений Федеральной противопожарной службы при локализации пожаров объектов энергетики объемным способом водной средой в метастабильном фазовом состоянии, Главное управление МЧС России по Приморскому краю (г. Владивосток, 2012 – 2020 гг.).

**Методология и методы исследования.** Методологией исследования был определен комплексный тактико-технический принцип локализации пожара объекта энергетики на основе сочетания ресурсов объекта энергетики и сил пожарно-спасательного гарнизона, а также развитие теории жизнеобеспечения участников тушения пожара в условиях воздействия опасных факторов.

Основу теоретических исследований составляли методы теории вероятностей и математической статистики, методы экспертных оценок и математического моделирования, полиинтервальный метод, декомпозиция развития возможных ситуаций при тушении пожаров в условиях воздействия опасных факторов пожара, выявление закономерностей, описания и обобщения.

Моделирование и расчеты, связанные с использованием средств защиты участников тушения пожаров, описанием действий персонала и пожарных в условиях задымления, обеспечения непрерывной работы по тушению развившихся пожаров, проведены с использованием разработанных программных комплексов, а также подтверждены результатами натурных экспериментов.

Информационной основой исследования являлись отечественные и зарубежные литературные и нормативные источники, статистические данные о пожарах в Российской Федерации, описания крупных пожаров и чрезвычайных ситуаций за 1997–2018 гг., планы тушения пожаров на наиболее значимые объекты энергетики, материалы научно-исследовательских работ в сфере организации тушения пожаров.

**Положения, выносимые на защиту:**

– результаты влияния масштабов пожаров на работоспособность объектов энергетики и возникновение социально-экономических чрезвычайных ситуаций,

связанных с прекращением подачи энергии;

– основные положения теории локализации пожаров объектов энергетики, способствующей сохранению их работоспособности в случае возникновения пожара с учетом достаточности сил и средств пожарно-спасательных гарнизонов;

– комплекс мер совершенствования средств защиты и снижения воздействия опасных факторов на участников тушения пожаров объектов энергетики;

– модели и технические решения, расширяющие возможности персонала объекта энергетики по ограничению распространения пожара в начальной стадии его развития, и меры ускорения прибытия подразделений пожарной охраны;

– основные положения теории повышения тактико-технических возможностей мобильных средств пожаротушения и показатели прекращения горения характерных для объектов энергетики материалов объемным способом за счет применения водной среды в метастабильном фазовом состоянии;

– способы, технические средства и показатели улучшения видимости от мобильных средств пожаротушения при осаждении дыма водной средой в метастабильном фазовом состоянии в объеме помещений объектов энергетики;

– прототип комплекса технических средств обеспечения работ в непригодной для дыхания среде при тушении развившихся пожаров объектов энергетики и технические решения, способствующие непрерывному тушению пожара;

– метод локализации пожара объекта энергетики, направленный на сохранение его работоспособности в случае возникновения пожара, и основанные на нем положения концепции оптимизации противопожарной защиты.

**Степень достоверности** основных результатов, выводов и рекомендаций диссертации обусловлена исследованием применения вероятностных методов к решаемой задаче, а также предпочтительным использованием интервального и полиинтервального методов. Экспериментальные исследования выполнялись с применением измерительного оборудования, прошедшего поверку в аккредитованной лаборатории. Производилось сопоставление экспериментальных и расчетных данных, полученных для идентичных условий. Удовлетворительная сходимость экс-

периментальных и расчетных данных подтвердила адекватность описания математической моделью исследуемых процессов.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы доложены на: XII всероссийской науч.-практ. конф. «Научно-техническое обеспечение противопожарных и аварийно-спасательных работ» (г. Москва, ВНИИПО МВД России, 1993); науч.-практ. конф. «Средства спасения – основные тенденции развития, состояние разработки и изготовления современных аварийно-спасательных средств и технология проведения поисково-спасательных работ» (г. Москва, ВНИИ ГОЧС, 1994); науч.-техн. конф. «Научно-технические решения по предотвращению и ликвидации пожаров» (Формула безопасности – 94) (г. Москва, ВИПТШ МВД РФ, 1994); Межд. конф. «Информатизация систем безопасности» ИСБ-94 Международного форума информатизации (г. Москва, ВИПТШ МВД РФ, 1994); науч.-техн. конф. «Научно-технические решения по предотвращению и ликвидации пожаров» (г. Москва, ВИПТШ МВД РФ, 1995); науч.-практич. конф. «Актуальные проблемы предупреждения и тушения пожаров на объектах и в населенных пунктах» (Пожарная безопасность – 96) (г. Москва, МИПБМВД РФ, 1996); I Сибирской науч.-практ. конф. «Проблемы деятельности государственной противопожарной службы регионов Сибири и Дальнего Востока» (г. Иркутск, Восточно-Сибирский институт МВД РФ, 1998); науч.-практ. конф. «Современные проблемы тушения пожаров» (г. Москва, МИПБ МВД РФ, 1999 г.); XV науч.-практ. конф. «Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков» (г. Москва, ВНИИПО МВД РФ, 1999 г.); II Межд. науч.-практ. конф. «Проблемы обеспечения пожарной безопасности Северо-Западного региона» (г. Санкт-Петербург, СПб университет МВД России, 2001); Межд. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы защиты населения и территорий от пожаров и катастроф» (г. Санкт-Петербург, СПб УГПС МЧС России, 2006); VI Форуме старших должностных лиц чрезвычайных служб экономик-участниц форума АТЭС (г. Владивосток, форум АТЭС, 2012); науч.-практ. конф. «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (г. Минск, КИИ МЧС Республики Беларусь, 2013); Межд. науч.-практ. конф. «Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и

научной деятельности в области пожарной безопасности» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2013); X Межд. науч.-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (г. Москва, ВНИИАЭС, 2016); IV межд. науч.-практ. конф. «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, 2018); I–VI межд. науч.-практ. конф. «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2012–2016, 2018 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 84 научных работы, в том числе 45 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России, 2 монографии, 8 патентов на изобретения, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, двух приложений. Содержание работы изложено на 422 страницах текста, включает в себя 39 таблиц, 195 рисунков и список литературы из 291 наименования.

# ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

## 1.1 Специфика пожаров объектов энергетики и дислокации сил пожарной охраны

Аварийное прекращение работы объекта энергетики может вызвать катастрофические последствия для населения и крупных промышленных узлов, так как остановка технологического процесса (подача тепловой и электрической энергии) парализует функционирование системы жизнеобеспечения населенных пунктов и чаще всего приводит к остановке производства на большинстве объектов экономики, в том числе критически важных для безопасности России. Возникновение аварийной ситуации на отдельном объекте энергетики может привести к сбою заметной части энергетического сектора в целом, так как последний представляет собой связанную сложную структуру, которая производит различные виды энергии и транспортирует ее до потребителя. Причиной таких событий весьма часто является пожар.

Особую опасность в этом отношении представляют АЭС. Пожар на АЭС, если он своевременно не локализован и не ликвидирован, может иметь катастрофические последствия. Такие события известны всему миру: аварии на Чернобыльской АЭС (рисунок 1.1) и АЭС «Фукусима-1».

В случае пожара останавливается процесс производства энергии и мощности перераспределяются на другие производительные силы. Это приводит к повышенной нагрузке, и в случае недостатка резерва мощности и при сочетании других факторов (уровень потребления, действия персонала и др.) может вызвать системную аварию, переходящую в ЧС. При этом косвенный ущерб, связанный с вынужденным прекращением работы объекта энергетики, может носить и социальный характер, выраженный в нарушении жизнедеятельности населения.



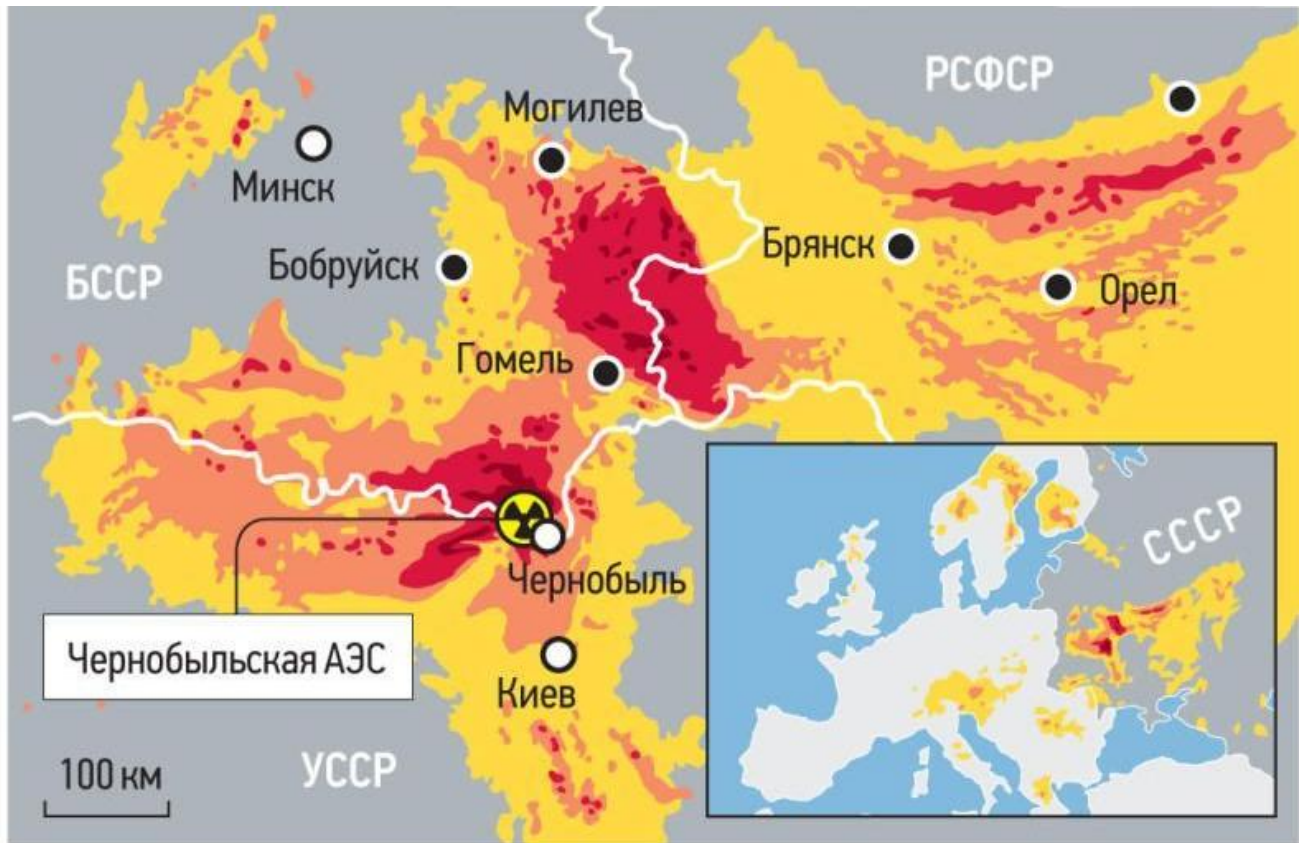


Рисунок 1.1 – Масштабы загрязнения территории после  
Чернобыльской катастрофы

Радиоактивность, кБк/м<sup>2</sup> ■ < 37, ■ 37–185, ■ 185–1480, ■ > 1480

Примером может служить крупная авария, произошедшая в 2005 г. в энергосистеме центрального региона из-за пожара на подстанции «Чагино», в результате которой без электроэнергии остались целые районы на территории Москвы, Московской, Тверской, Рязанской и Калужской областей [1]. По данным МЧС России количество пострадавших превысило 4 млн человек [13]. Данная авария показала, как незначительное событие при стечении с другими факторами (износ оборудования, действия персонала, уровень потребления электроэнергии, температура окружающей среды) может нарушить работу части энергосистемы и нанести значительный косвенный ущерб.

Такие события происходят регулярно и, как правило, чаще в холодный период года. Социально-значимые пожары крупных объектов энергетики на территории России происходят ежегодно: Барнаульская ТЭЦ (2010); Новосибирская ТЭЦ-2 и Верхнетагильская ГРЭС (2011); Тверская ТЭЦ-3 (2012); Кармановская

ГРЭС (2013); Кизеловская ГРЭС (2014); Сургутская и Серовская ГРЭС (2015); Березовская, Рефтинская и Самарская ГРЭС (2016) [6]. Недавним аналогичным событием стало прекращение работы 1 октября 2017 г. двух электростанций в Якутии из-за взрыва в помещении с резервными турбинами Якутской ГРЭС, повлекшего возгорание масла. Площадь пожара составила 70 м<sup>2</sup> (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Пожар на Якутской ГРЭС 1 октября 2017 г. и его последствия

Отключение Якутской ГРЭС повлекло за собой прекращение генерации электричества Якутской ТЭЦ (филиал ПАО «Якутскэнерго»), в результате чего Якутск и его пригороды, а также четыре района Республики Саха, оказались обесточены, прекратилась подача тепла в г. Якутске и пригородах. Всего в результате аварии без электричества остались около 310 тысяч человек [14]. Данный пример наглядно демонстрирует соотношение небольшого масштаба пожара и общих его последствий.

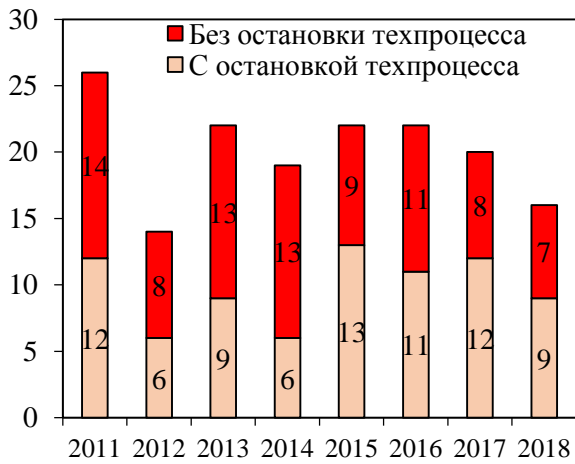
Анализ аварий на одном виде энергопроизводящих предприятий (ТЭЦ) за период с 2004 по 2017 гг. показал, что порядка 92 % крупных аварий вызваны

отказами в работе оборудования и лишь 8 % связаны с другими причинами, из них: 69,6 % сопровождались пожарами; 7,4 % – взрывами; 14,8 % – выбросами горячей воды; 7,4 % – выбросами пара. В главных корпусах произошло 62,9 % аварий, на гидротехнических сооружениях – 18,5 %, в электротехнических сооружениях – 18,6 %. Большинство аварий происходит в главных корпусах ТЭЦ, из них: в котельных отделениях – 18,5 %, в машинных залах – 44,4 %. Кроме того, в этих помещениях чаще всего происходит гибель и травмирование людей при авариях: в котельных отделениях погибло 66,4 % и получили травмы различной степени тяжести 34 %; в машинных залах погибло 33,6 % и получили травмы различной степени тяжести 66 %. [6].

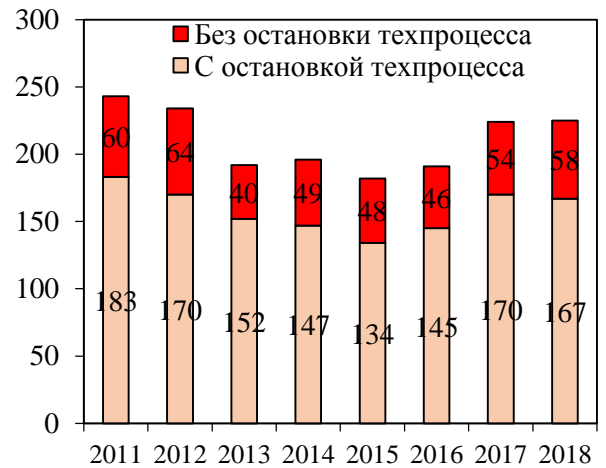
Меньшие, по сравнению с приведенными случаями, пожары, которые тем не менее приводят к перебоям в поставке энергии, происходят на территории России ежегодно и исчисляются десятками. В результате анализа пожаров, произошедших на объектах энергетики за 2011–2018 гг., установлено, что доля пожаров на энергопроизводящих объектах, которые приводят к остановке технологического процесса, достигает в отдельные годы половины, а на энергораспределительных объектах – четверти от общего числа. Детализация влияния пожаров, приводящих к остановке технологического процесса объекта энергетики, в зависимости от помещения возникновения, приведена на рисунке 1.3.

Пожар, в соответствии с принятой в России классификацией, может перерасти в ЧС различного масштаба [15, 16]. Проведенный анализ ЧС за период с 1997 по 2016 гг. выявил, что аварии в сфере энергетики в общем количестве техногенных и природных ЧС составляют заметную долю, особенно в ряду крупномасштабных ЧС (рисунок 1.4).

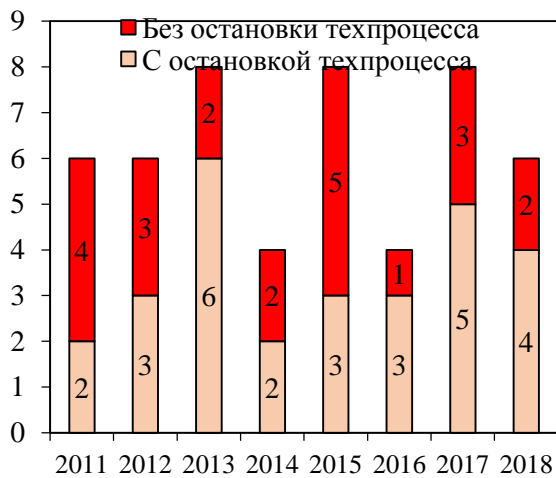
Общее число пострадавших за рассматриваемый период при ЧС в сфере энергетики составило почти 5 млн человек, большая часть из которых признана пострадавшими при аварии на подстанции «Чагино» в 2005 г., что составляет 83 % от общего числа пострадавших при всех видах ЧС.



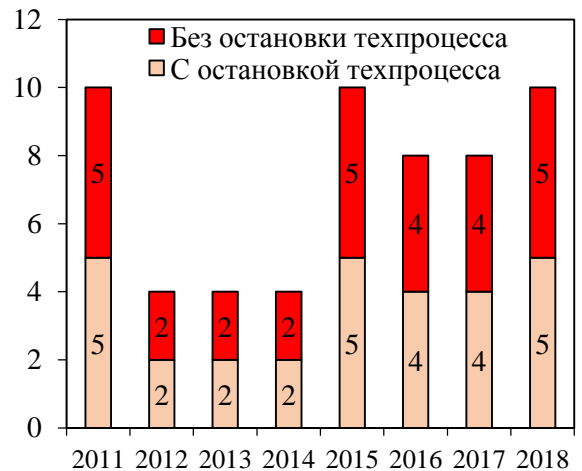
а)



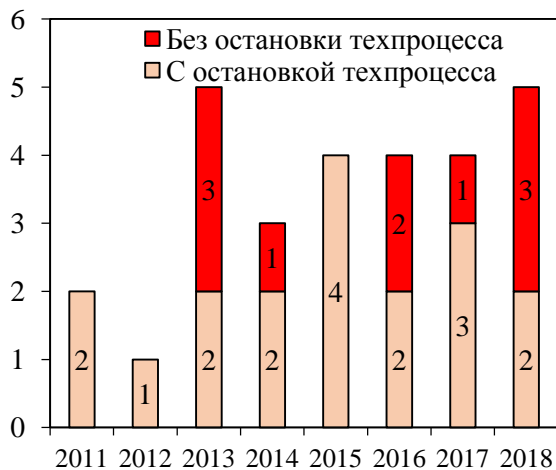
б)



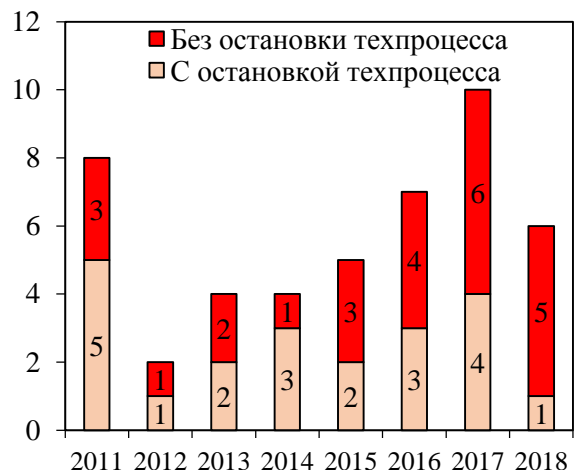
в)



г)



д)



е)

Рисунок 1.3 – Последствия пожаров в сфере энергетики, связанные с остановкой выработки энергии, в 2011–2018 гг.:

- а) энергопроизводящие объекты; б) энергораспределительные объекты;  
 в) энергоблок тепловой или гидравлической электростанции;  
 г) кабельный тоннель, галерея; д) котельная; е) дизельная электростанция

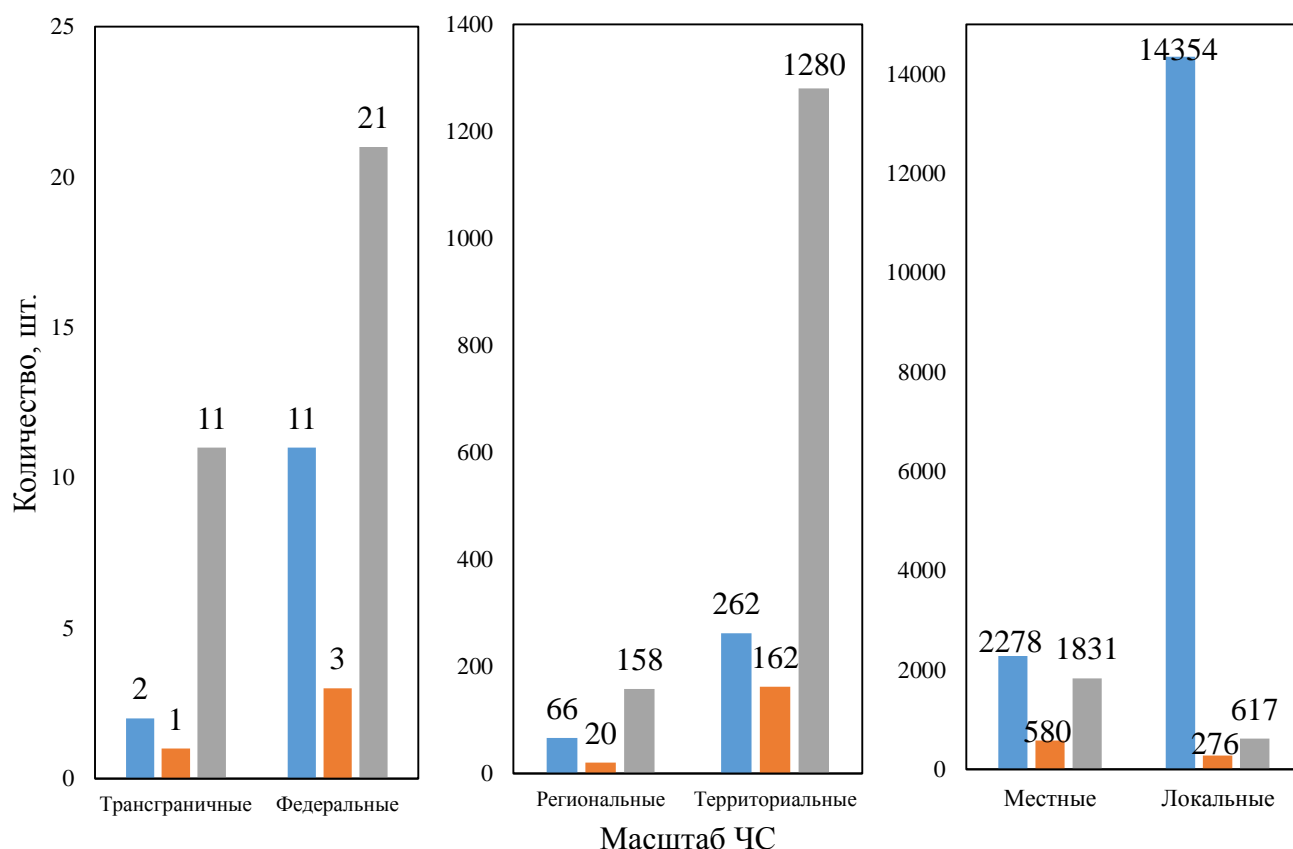


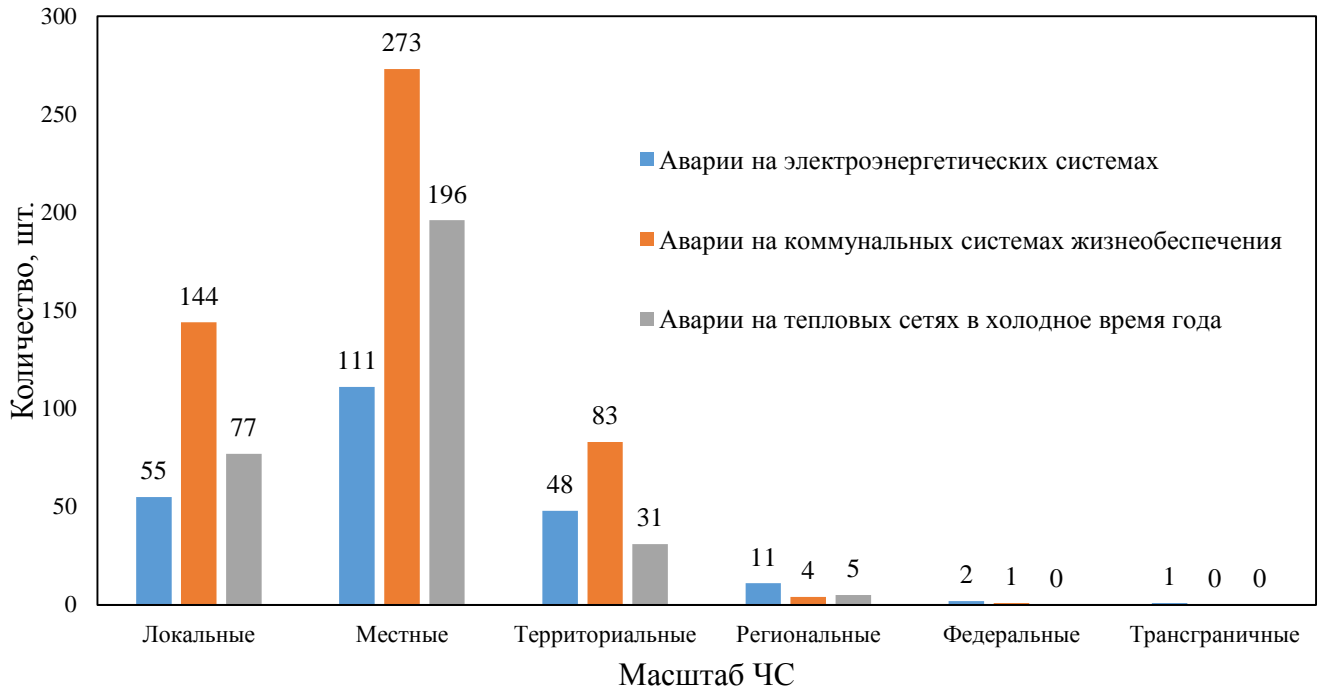
Рисунок 1.4 – Число аварий в сфере энергетики по отношению к основным видам и масштабу ЧС за 1997–2016 гг.

Аварии в сфере энергетики распределяются на подвиды, как указано на рисунке 1.5.

Подавляющее большинство пострадавших от прекращения подачи различных видов энергии не подвергались воздействию ОФП или их сопутствующих проявлений, но столкнулись с нарушением жизнедеятельности. Закономерно возникает вопрос о причинно-следственной связи данных событий.

Следует отметить, что принятая в России система обеспечения безопасности, в частности, пожарной, рассматривает обеспечение безопасности как ограждение человека от прямого воздействия ОФП.

В п. 4 статьи 5 Федерального закона от 22 июля 2008 г. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [17] законодательно закреплено, что пожарная безопасность с учетом риск-ориентированного подхода считается обеспеченной при условии непричинения вреда людям (своевременной эвакуации из горящего объекта) и третьим лицам в результате воздействия ОФП (индивидуальный и социальный риски).



Аварии в сфере энергетики

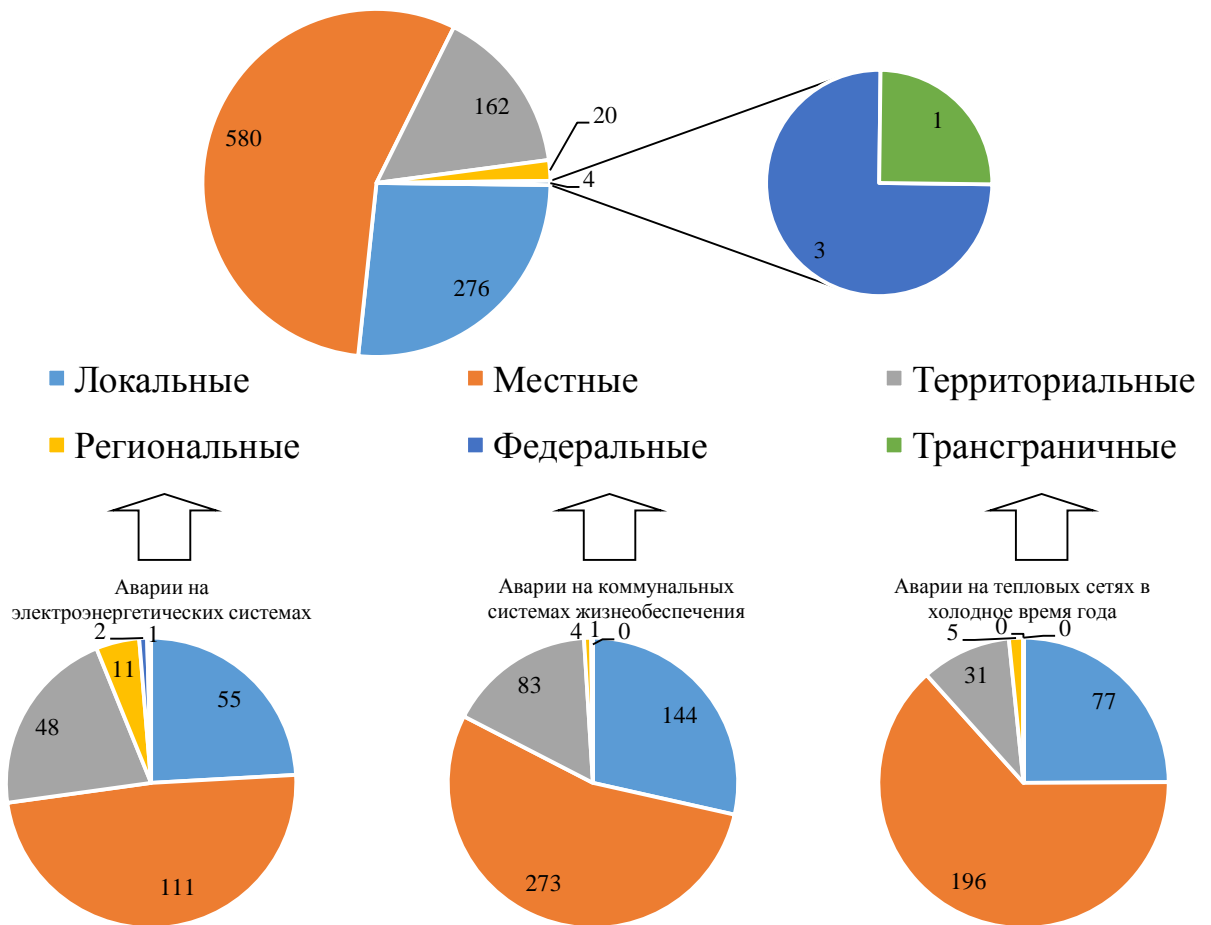


Рисунок 1.5 – Распределение аварий в сфере энергетики по масштабу ЧС и их подвидам за 1997–2016 гг.



Понятия пожарного риска и допустимого пожарного риска позволяют взглянуть на проблему несколько шире, за пределами воздействия ОФП на человека и объект защиты. Так, допустимый пожарный риск подразумевает обоснование его уровня исходя из социально-экономических условий, под которыми понимается обеспечение благополучия населения на государственном уровне. Данную сферу регулирует Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [18].

Понятие ЧС рассматривает уже не событие на объекте защиты, а обстановку на определенной территории. Наряду с событиями, которые могут в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери, в понятии ЧС предусматривается нарушение условий жизнедеятельности людей.

Пожар является одним из видов ЧС, поэтому во взаимоприменении указанных законов ([17, 18]) нет противоречий, а напротив, их совместное применение указывает на необходимость комплексного применения законодательства в сфере обеспечения безопасности, что подтверждается и зарубежным опытом [19, 22].

На основе анализа работы пожарных подразделений в России, в настоящей работе рассматривается необходимость создания концепции коллективной защиты при реагировании на различные катастрофы и пожары. Создание данной концепции невозможно без взаимоприменения указанных законов ([12, 13]) для таких важных для безопасности страны объектов, как объекты энергетики.

Авария (пожар) на объекте энергетики, в результате которой прекращается подача тепловой или электрической энергии, является фактором, влекущим нарушение условий жизнедеятельности людей и создающим предпосылки для возникновения ЧС. Соответственно масштаб этой ЧС будет определяться зоной, которую объект энергетики обеспечивает тепловой, либо электрической энергией. Нарастание масштаба ЧС будет зависеть от климатических условий и удаленности зоны от других населенных пунктов, объектов жизнеобеспечения. Таким образом объекты

энергетики, являющиеся стержнем системы жизнеобеспечения населенных пунктов и промышленности, ввиду указанной специфичности их технологического процесса, следует выделить в особую группу по обеспечению непрерывности технологического процесса.

Одним из значимых секторов безопасности является пожарная безопасность, к которой должны предъявляться особые требования по обеспечению непрерывности технологического процесса в аварийных ситуациях. В результате анализа российских и зарубежных источников в сфере обеспечения пожарной и промышленной безопасности [4, 5, 16–43] установлено, что в такой постановке проблема до настоящего времени не рассматривалась.

Система обеспечения пожарной безопасности объекта защиты, как известно, включает в себя систему предотвращения пожара, систему противопожарной защиты, комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности. Следует отметить, что уровень обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики ввиду значимости этих объектов поддерживается выше, чем средний уровень пожарной безопасности в промышленности. Особенно высок уровень пожарной безопасности объектов атомной энергетики, о чем свидетельствует минимальное число произошедших на них пожаров [23–25, 44–46].

Система предотвращения пожара, система противопожарной защиты и комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объекта энергетики, составляющие систему обеспечения пожарной безопасности, являются препятствиями на пути возникновения и распространения пожара. Однако исключить пожар полностью не представляется возможным. Например, одной из причин пожара могут стать сбои в работе электрооборудования. Ряд зарубежных экспериментов показал, что длительное воздействие температуры свыше 55 °С приводит к возникновению неисправности электрооборудования, обеспечивающего пожарную безопасность АЭС, и, как следствие, к возникновению возгорания [26]. Учитывая сложность объектов энергетики, особенно АЭС, можно констатировать, что пожар может возникнуть из-за большого количества



причин различного характера. Поэтому в системе обеспечения ПБ предусматриваются меры по тушению возможных пожаров [27–29].

Так, например, 18 февраля 2018 г. в результате возгорания на трансформаторе Т-28, находящемся за пределами энергоблока Курской АЭС, под действием защиты произошло отключение одного из четырех действующих энергоблоков (1000 МВт) с нагрузкой 1065 МВт. Станция снизила рабочую мощность на 1000 МВт. Последствий для потребителей не наступило, пожар был ликвидирован силами объектового пожарного подразделения в течение часа.

По данным Министерства энергетики Российской Федерации, нарушений условий безопасной эксплуатации не было, радиационных последствий не наступило. При этом отмечено, что для обеспечения в ЕЭС России нормативного резерва мощности на загрузку отданы команды включить в работу: энергоблок № 11 на Заинской ГРЭС (филиал АО «Татэнерго» – Заинская ГРЭС); энергоблок № 3 на ТЭЦ-26 (филиал ПАО «Мосэнерго» – «ТЭЦ-26»); турбогенератор ТГ-1 на Хуадянь-Тенинской ТЭЦ (дочернее зависимое общество ПАО «ТГК-2» и китайской корпорации «Хуадянь» – ООО «Хуадянь-Тенинская ТЭЦ») [47].

Обстоятельства развития пожара на объекте энергетики не всегда позволяют выполнить задачу по локализации пожара. Это происходит при развитии запроектных (тяжелых) аварий – событий, когда первое же проявление аварии прекращает работу объекта (Чернобыльская АЭС). В таких случаях осуществляется локализация последствий, масштаб которых напрямую зависит от характера деструктивного события и угрозы дальнейшего распространения. Катастрофы подобных масштабов редки. Чаще, нарушение работоспособности объекта происходит в ходе нарастания первичной аварии (пожара). О периодичности таких пожаров говорилось выше. Механизм развития подобных пожаров может быть, например, таким [48]: 01 февраля 2016 года в 7 часов 41 минуту по местному времени технологической защитой отключился энергоблок № 3 Березовской ГРЭС в Шарыповском районе Красноярского края. В котельном отделении на 20-й отметке было обнаружено сильное задымление. На место задымления оперативно прибыли сотрудники

пожарно-аварийной службы «Сирена». Были проведены все необходимые в подобных случаях мероприятия. Задымление значительно затруднило обнаружение очага горения в условиях разновысоких отметок размещения оборудования. В результате площадь возгорания составила 850 м<sup>2</sup>. При осмотре оборудования станции после пожара было обнаружено, что возгорание мазута произошло в котельном цехе в районе энергетического котла № 3 на отметках 20 и 26 м. По предварительным данным, причина пожара – повреждение мазутопровода в районе вновь запущенного в работу 1 декабря 2015 года энергетического котла № 3. В результате пожара на станции обнаружены следующие повреждения: деформация металлоконструкций кровли над энергетическим котлом № 3 на площади около 300 м<sup>2</sup>; деформация металлоконструкции технологических площадок энергетического котла № 3 (рисунок 1.6).

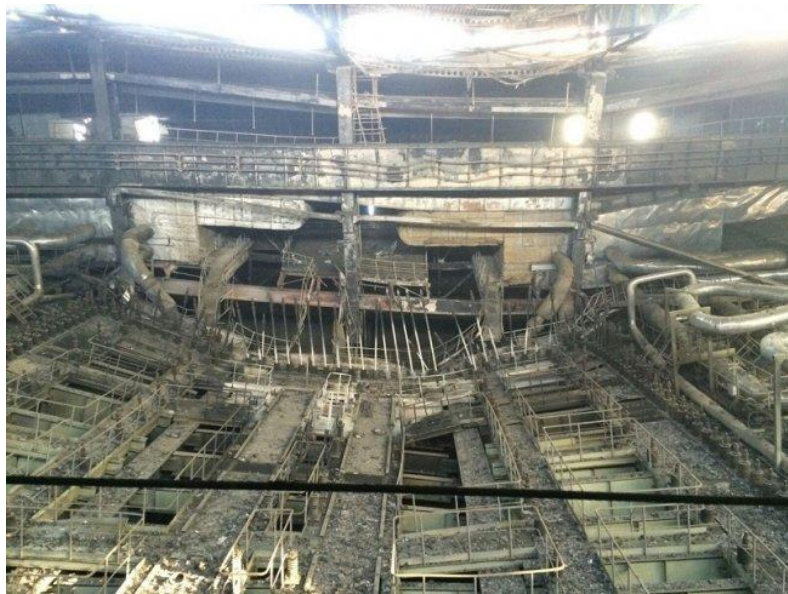


Рисунок 1.6 – Общий вид последствий пожара 1 февраля 2016 г. на энергоблоке № 3 Березовской ГРЭС в Шарыповском районе Красноярского края

Основные опасения вызывало состояние корпуса котла и, особенно, ключевых вертикальных подвесных стоек, на которых держался котел высотой 106 м и весом 25 т. Стойки были повреждены до такой степени, что котел потерял вертикальное положение, но по оценке аналитиков остальные повреждения могут быть устранены. Окончательные последствия пожара будут установлены по результатам

соответствующих экспертиз. При этом финансовыми аналитиками прогнозировались следующие сценарии [48]:

- частичная потеря оборудования – полное восстановление в течение 6 мес. при 2,5 млрд руб. дополнительных капитальных вложений и 2,5 млрд руб. недополученных доходов (только в течение 2016 г.);

- большая потеря оборудования - полное восстановление в течение 1–1,5 лет при 5 млрд руб. дополнительных капитальных вложений и до 10 млрд руб. недополученных доходов (в течение 2016 г. и частично в 2018–19 гг.);

- потеря котла – это 18–24-месячный период восстановления, 8–10 млрд руб. дополнительных капитальных вложений и 22 млрд руб. недополученных доходов (в течение ближайших 4 лет).

По сравнению с 2014 г. в 2015 г. в 14 раз увеличился материальный ущерб от пожаров на объектах энергетики, который был обусловлен одним весьма крупным пожаром, возникшим 4 января 2015 г. в главном корпусе Сургутской ГРЭС-2. Сумма ущерба составила 1,6 млрд руб., что в 30 раз больше ущерба от остальных 569 пожаров, произошедших на объектах энергетики за 2015 г. [11]. Причиной этого пожара стало воспламенение паров турбинного масла в результате его попадания на разогретые поверхности питательного турбопитателя с последующим быстрым распространением огня по поверхности горящего масла. Тепловое воздействие на нижнюю часть покрытия машинного зала привело к обрушению кровли на площади 600 м<sup>2</sup> и повреждению технологического оборудования. Образовавшийся завал осложнил дальнейшие действия по тушению пожара. Согласно описанию пожара основными причинами значительного ущерба были определены:

- низкий предел огнестойкости несущих конструкций здания главного корпуса;

- значительный объем турбинного масла в маслосистемах турбогенератора и вспомогательных механизмах, разветвленность их схем;

- наличие большого количества силовых и контрольных кабелей с горючей оболочкой, с прокладкой значительной части их в коробах и шахтах;

- большой объем внутренних помещений главного корпуса.

Подобные причины характерны для пожаров большинства крупных объектов энергетики. Наибольший материальный ущерб при пожарах объектов энергетики наносит горение в энергоблоке электростанций и в кабельных тоннелях, галереях (таблица 1.1). Указанные помещения объектов энергетики характеризуются непрерывным технологическим процессом, наличием многоуровневой планировки, значительным выделением при горении материалов тепловой энергии. Данные обстоятельства, в совокупности с большой горючей нагрузкой, приводят к быстрому развитию пожара.

Таблица 1.1 – Средний ущерб от пожара на объектах энергетики

Вид объекта энергетики [55]	Средний ущерб, тыс. руб.
Здание энергоблока атомной, тепловой, гидравлической, дизельной, другого вида электростанции	542
Кабельный тоннель, галерея	206
Электротрансформаторная подстанция, будка, трансформатор, электродизельная установка	99
Здание компрессорной, газогенераторной, водородной и кислородной станции	75
Здание котельной	68
Здание для зарядки и обслуживания аккумуляторных батарей	11

Непропорционально высокий ущерб от пожаров энергоблоков электростанций и кабельных сооружений объясняется именно масштабом пожаров в данных помещениях. Значительное скопление горючих материалов в виде турбинного масла и изоляции кабелей способствует интенсивному развитию пожара, а сложная планировка помещений и потребность в отключении электрооборудования увеличивают время подачи ОТВ в очаг горения.

Статистика однозначно указывает на формирование общего материального ущерба от пожаров объектов энергетики за счет последствий крупных пожаров (рисунок 1.7).

Как показал пожар, произошедший 4 января 2015 г. в главном корпусе Сургутской ГРЭС-2, одна такая чрезвычайная ситуация может нанести ущерб, сопоставимый со всеми пожарами на объектах энергетики за определенный период [49].

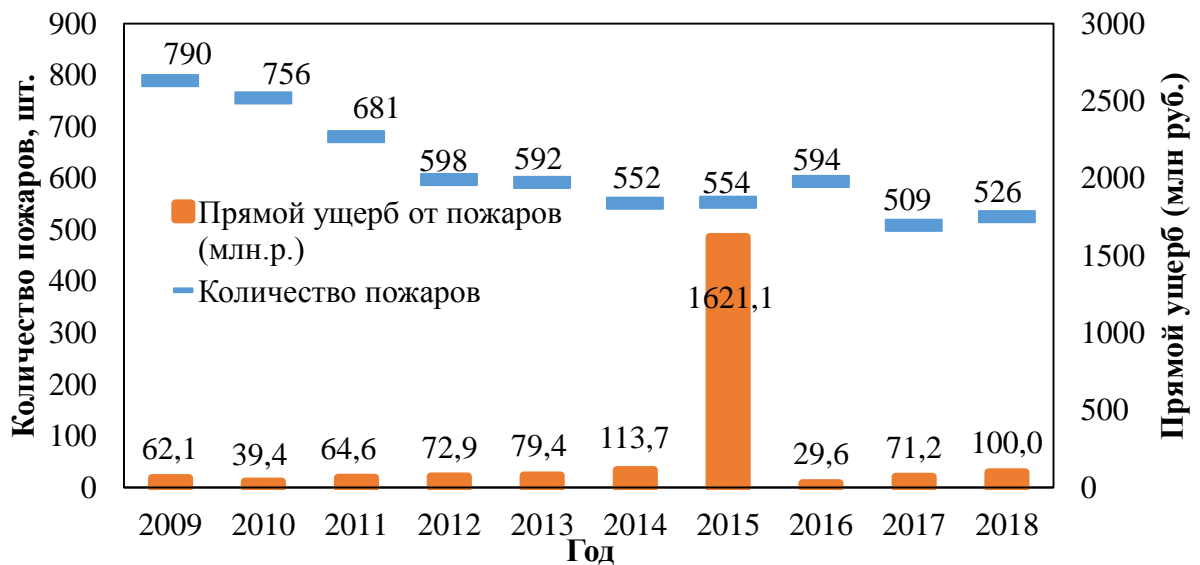


Рисунок 1.7 – Количество пожаров и прямой ущерб на объектах энергетики по годам:  
■ – прямой ущерб от пожаров, млн руб.; ■ – количество пожаров, шт.

Развитию пожаров объектов энергетики до крупных размеров способствуют и конструктивные особенности данных объектов. Как известно, главный корпус энергопроизводящих объектов, где размещается основное технологическое оборудование – паровые котлы и турбоагрегаты, на долю которого приходится более половины общих капиталовложений, представляет собой трех-, четырехпролетное здание. Для большинства отечественных и зарубежных ТЭС характерны полиблочные компоновки с размещением всех энергоблоков в одном здании. Преимущества таких компоновок состоят в сокращении расхода строительных конструкций и материалов, уменьшении количества мостовых кранов, снижении удельной площади застройки и строительного объема, уменьшении размеров промышленной площадки. Все это приводит к сокращению удельных капиталовложений и строительно-монтажных работ [50].

Наиболее серьезный недостаток полиблочной схемы – опасность распространения пожара по зданию, в результате чего из строя могут выйти несколько агрегатов. По ряду причин устройство противопожарных перегородок между отдельными энергоблоками в главном корпусе невозможно. Последствия аварий с пожарами усугубляются низкой огнестойкостью металлических стропильных ферм, которые используются в качестве несущих конструкций, а также применением в прошлом сгораемых кровельных материалов и утеплителя (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Результат обрушения металлических строительных ферм из-за воздействия пожара

За последние 30 лет в главных корпусах энергопроизводящих объектов произошла 31 крупная авария с выходом из строя более одного энергоблока (рисунок 1.9). Согласно статистике, примерно 90 % крупных аварий вызваны отказами в работе оборудования и сопровождались пожаром, 10 % – являются следствием повреждения строительных конструкций. На долю аварий, произошедших в машинных отделениях, приходится 72% от общего их числа, в котельных отделениях – 23 % и около 5 % – в кабельных тоннелях.

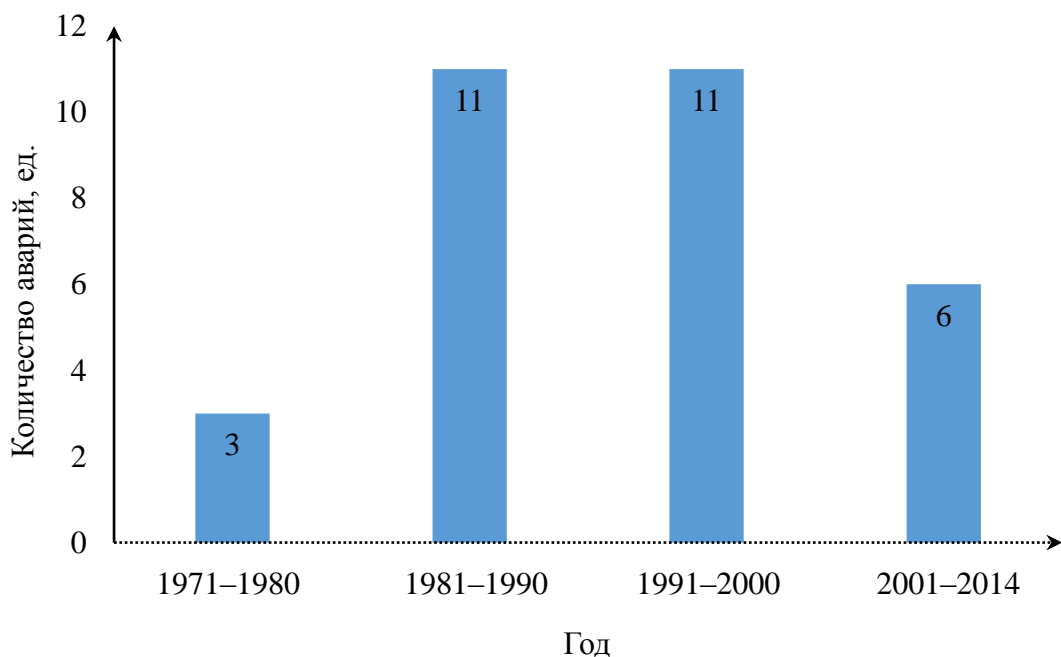


Рисунок 1.9 – Аварии в главных корпусах энергопроизводящих объектов с выходом из строя более одного энергоблока за период с 1971 по 2014 гг. [51]

Пожары в машинных отделениях главных корпусов практически всегда связаны с нарушением систем смазки и регулирования турбоагрегатов, в которых содержится значительное количество масла под давлением. Например, для энергоблока мощностью 800 МВт необходимое количество масла – 58 м<sup>3</sup> при давлении в системах регулирования – 4 МПа, в системе смазки подшипников и уплотнений – 0,3–0,4 МПа [52]. Дополнительную пожарную опасность представляет наличие водорода в системе охлаждения генератора. В котельных и бункерных отделениях, главным образом в надбункерных галереях, опасность связана с наличием угольной пыли, ее отложениями на строительных конструкциях, образованием взрывоопасной пылевоздушной смеси.

Наиболее частыми причинами аварий в машинном зале являются: дисбаланс ротора турбоагрегата из-за обрыва рабочих лопаток цилиндра низкого давления, неудовлетворительный ремонт маслосистем, асинхронный пуск от сети турбогенератора после его останова, усталостное разрушение ротора, разрушение бандажного кольца вследствие его износа и другие.

К крупным авариям с пожаром и обрушением строительных конструкций здания главного корпуса, в пределах бывшего СССР, можно отнести следующие:

– на Сырдарьинской ГРЭС в 1981 г. обрыв около 30 рабочих лопаток последних ступеней цилиндра низкого давления энергоблока № 4 с последующим пожаром привел к выходу из строя 10 энергоблоков станции мощностью по 300 МВт. Простой после аварии составил: для энергоблоков № 1, 2, 4 – 1382 ч, № 3 – 927 ч, № 5 – 564 ч, № 6 – 658 ч, № 7 – 290 ч, № 8 – 80 ч, № 9 – 108 ч, № 10 – 27 ч;

– на Экибастузской ГРЭС-1 в 1984 г. авария на энергоблоке № 5 и последующий пожар привели к обрушению кровли машинного отделения в 10 пролетах. Выведено из строя 4 энергоблока мощностью по 500 МВт. Простой энергоблока № 5 составил 2640 ч;

– на Гусиноозерской ГРЭС в 1990 г. из-за взрыва в системе пылеприготовления в районе энергоблока № 5 обрушилось около 1512 м<sup>2</sup> покрытия и 3500 м<sup>2</sup> стенового ограждения. Простой основного оборудования составил 5760 ч;

– на Сырдарьинской ГРЭС в 1990 г. отрыв рабочих лопаток последней ступени цилиндра низкого давления турбоагрегата № 7 привел к пожару. Остановлено 3 энергоблока станции мощностью по 300 МВт. Полностью разрушен турбоагрегат № 7. Обрушена кровля машинного отделения с 33 по 36 оси, поврежден турбогенератор и вспомогательное оборудование. Ущерб составил около 73 млн руб. (в ценах 1990 г.), простой для энергоблока № 1 – 7005 ч, № 2 – 3806 ч;

– на Экибастузской ГРЭС в 1990 г. обрыв 36 лопаток цилиндра низкого давления турбины энергоблока № 5 привел к повреждению с последующим разуплотнением подшипников и выводов турбогенератора. Возникший в результате аварии пожар привел к потере устойчивости и обрушению кровли машинного отделения над энергоблоками № 5, № 6 и № 7. Общая мощность вышедших из строя блоков составила 2000 МВт. Прямой ущерб от аварии – около 70 млн руб. (в ценах 1990 г.), общая недовыработка электроэнергии составила 566000 тыс. кВт·ч, простой для энергоблока № 5 – 10440 ч, № 6 – 2653 ч, № 7 – 792 ч, № 4 – 288 ч;

– на Новокуйбышевской ТЭЦ-2 в 1992 г. из-за возгорания мазута в районе нижнего яруса горелки котла № 11 остановлено 4 турбоагрегата. Значительно поврежден котел ТГМ-84Б. Обрушены фермы в осях 44-47, подкрановые балки, оголовки колонн, связи по колоннам, стеновые панели в рядах В и Д выше отметки подкрановых путей. Разрушено 80 плит покрытия и перекрытия на отм. +8,000 м по фронту котельного отделения, площадь обрушения кровли составила 800 м<sup>2</sup>. Недоотпуск по тепловой энергии – 129,9 тыс. Гкал, по электроэнергии – 25632 тыс. кВт·ч, ущерб – 168,7 тыс. руб. (в ценах 1992 г.);

– на Каширской ГРЭС-4 в 2002 г. усталостная трещина в металле ротора генератора привела к его разрушению. Возник пожар, который привел к обрушению 600 м<sup>2</sup> покрытия в машинном отделении станции. Полностью уничтожен энергоблок № 3, из строя выведено 3 блока по 300 МВт каждый. Восстановить третий энергоблок станции удалось только через 4 года. Тепловой контур был восстановлен через 312 ч после аварии. На устранения последствий затрачено около 1 млрд руб. (в ценах 2002 г.).



– на Экибастузской ГРЭС-1 в 2003 г. из-за резкого повышения давления подогревателя высокого давления на блоке № 3 (по не уточненным данным из-за лавинообразного обрыва труб с питательной водой) колпаком разрушена кровля машинного отделения, возник пожар. В результате аварии потеря мощности станцией составила 1500 МВт, энергоблок № 3 полностью выведен из строя, стоимость его модернизации составила около 140 млн руб. (в ценах 2004 г.), простой для энергоблоков № 6 и № 7 – 72 ч. Погиб один человек и несколько пострадало;

– на Рефтинской ГРЭС в 2006 г. в результате нарушения плотности кольца уплотнения генератора энергоблока № 10 произошло возгорание масла, которое попало на генератор, в результате чего возник пожар. Обрушилась кровля в ячейках блоков № 9 и № 10 машинного отделения. Строительные конструкции повредили ряд общих коммуникаций, в результате чего пришлось аварийно остановить блок № 7. Площадь возгорания составила 400 м<sup>2</sup>, продолжительность пожара – 6 ч. Полностью разрушен турбогенератор энергоблока № 10, остановлена вся первая очередь станции. Ущерб – около 237 млн руб. (в ценах 2006 г.), простой для энергоблока № 10 – 11712 ч.;

– на ТЭЦ-1 Улан-Удэ в 2008 г. короткое замыкание в машинном отделении на кабеле под турбиной № 7 привело к ее возгоранию. Огонь перекинулся в маслобаки, где находилось 18 т турбинного масла. Через 1 ч после начала пожара произошел взрыв водорода, обрушилась часть кровли машинного отделения. Площадь пожара составляла 1000 м<sup>2</sup>. На локализацию пожара ушло 3 ч. В результате аварии без тепла остались 168 тыс. чел. В г. Улан-Удэ введен режим ЧС. Полностью уничтожены турбоагрегаты № 7 и № 6. Обрушена кровля машинного отделения на площади 300 м<sup>2</sup>. Отключены все 7 энергоблоков станции. Ущерб от недоотпуска тепловой энергии составил – 410 млн руб., электроэнергии – 250 млн руб., полный ущерб от аварии оценивается в 3 млрд руб. (в ценах 2008 г.);

– пожар на Углегорской ТЭС весной 2013 г. полностью уничтожил первую очередь электростанции. Причиной явилась разгерметизация системы топливоподачи в котельном отделении на участке между бункером угля и мельницей котла. Огонь возник на отметке +22.000 м бункерного отделения, на участке, где проектом

не были предусмотрены системы пожарной сигнализации и автоматического пожаротушения. Затем огонь перекинулся на кровлю машзала, которая через некоторое время обрушилась, повредив маслосистему двух энергоблоков. В результате аварии были полностью уничтожены блочные щиты управления, два турбоагрегата, обрушилась вся кровля над машинным отделением. В ходе разбора завалов и восстановления станции было вывезено более 880 т металлолома. Общий ущерб от аварии составил более 21 млн долл. США (в ценах 2013 г.). Погиб один человек и пятеро было госпитализированы с ожогами различной степени тяжести. Полностью строительные конструкции удалось восстановить только через 5 мес., энергоблок № 1 введен в эксплуатацию через полгода после аварии, а блок № 4 – через 7,5 мес. Дополнительный ущерб, связанный со строительством резервной котельной для теплоснабжения г. Светлодарска, оценен в 57,5 млн грн. А ущерб, вызванный временным остановом по добыче угля в Донецке, т. к. станция являлась основным его потребителем, только предстоит оценить.

Подобные аварии нередки и за рубежом. Крупная авария произошла в 2012 г. на ТЭС Boryeong в Южной Корее. Были повреждены турбоагрегаты энергоблоков № 1 и № 2, а также на короткое время остановлены энергоблоки № 3 и № 4. Время простоя энергоблоков № 1 и № 2 составило 1440 ч. Согласно зарубежным оценкам, средний ущерб от аварий с разрушением системы регулирования турбины составляет порядка 20 млн евро на энергоблок (простой блока – около 4 мес.). При нарушении целостности системы смазки турбоагрегата - 40 млн. евро/энергоблок (простой блока – 9 мес.). В России простой при выходе из строя турбоагрегата, по экспертным оценкам, составляет от 6 мес./энергоблок для турбин малой мощности до 12 мес./энергоблок для турбин большой мощности.

Вторым по значимости типом являются аварии в котельных отделениях главных корпусов. Данные события в значительной степени связаны с системой топливоподачи: взрывы отложений угольной пыли на элементах строительных конструкций или в бункерах угля, механические повреждения мазутопроводов, взрывы топлива в топке котла и т.д. Аварии такого типа в условиях полиблока могут приводить к повреждению оборудования соседних энергоблоков и разрушению наружных

ограждающих конструкций. Особенно опасными являются крупные аварии на ТЭЦ, в результате которых наряду с электрической прекращается отпуск и тепловой энергии. Так, из-за аварии на ТЭЦ-1 в г. Улан-Удэ в 2008 г. было введено чрезвычайное положение. Похожая ситуация произошла и в г. Бийске в 1984 г. после событий на ТЭЦ-1.

Анализ крупных аварий с выходом из строя более одного энергоблока позволил оценить частоту их возникновения как  $0,0034$  (аварий)/(энергоблок) $\times$ (год). В свою очередь, недопустимым, требующим обязательного выполнения мер по снижению, является уровень риска более  $1 \cdot 10^{-3}$ . Уровнем риска называют интегральный показатель, который включает вероятность (частоту) наступления рассматриваемого события (аварии) за год и связанный с ним возможный ущерб [51].

Среди основных видов ущерба при аварии на крупных объектах энергетики выделяются следующие [53]:

- безвозвратные потери средств производства;
- затраты на ремонтно-восстановительные работы (прямой ущерб);
- потери из-за снижения производственных возможностей по генерации электроэнергии (упущенная выгода);
- потери от ухудшения технологических параметров при вводе резервных мощностей взамен выбывшей вследствие аварии;
- убытки у потребителя из-за недополучения электроэнергии;
- экологический ущерб;
- социальный ущерб.

Анализ аварийных событий на крупных объектах энергетики и их последствий за последние десятилетия позволяет оценить частоту аварий с пожаром и выходом из строя одного и более энергоблоков, а также соответствующий ущерб, и использовать полученные данные для оптимизации компоновочных решений с учетом данных событий за весь период эксплуатации станции. Соответствующие работы ведутся в МГСУ на кафедре строительства объектов тепловой и атомной энергетики. Такой подход позволяет снизить степень концентрации производственных

линий, располагаемых в одном главном корпусе, что способствует дополнительному повышению безопасности при эксплуатации. Кроме того, несмотря на некоторое увеличение капиталовложений, снижаются общие издержки за счет сокращения продолжительности строительства. Также необходимо отметить, что современная тенденция, направленная на повышение экономичности и сокращение удельных капиталовложений в строительство новых ТЭС, привела к увеличению единичной мощности и коэффициента полезного действия энергоблоков, что в основном было достигнуто за счет изменения параметров пара. Все это способствовало усложнению самих производственно-технических систем и, как следствие, увеличило возможный ущерб от крупных аварий. В таких условиях одним из путей решения описанной проблемы является оптимизация компоновочных решений главных корпусов с учетом фактора будущих аварий, однако этот процесс не может быть быстрым и с учетом срока эксплуатации займет десятилетия [50].

В России имеется порядка 500 крупных объектов энергетики. Самыми крупными являются АЭС (с общей мощностью более 26 тыс. МВт и средним возрастом 36 лет); 106 гидроэлектростанций (общей электрической мощностью почти 50 тыс. МВт и средним возрастом 54 года); 221 теплоэлектроцентраль (общей электрической мощностью более 70 тыс. МВт, тепловой мощностью более 200 тыс. Гкал/ч и средним возрастом 57 лет); 64 ГРЭС (общей электрической мощностью более 73 тыс. МВт, тепловой мощностью почти 25 тыс. Гкал/ч и средним возрастом 58 лет), а также объекты энергетики, поставляющие тепловую и электрическую энергию объектам и населенным пунктам (котельные, трансформаторные подстанции и трансформаторные пункты) [7]. Особенностью объектов энергетики является то, что они взаимосвязаны со всеми отраслями деятельности человека и имеются как в крупных городах и промышленных центрах, так и в отдаленных поселениях, и в сельскохозяйственном производстве (рисунок 1.10).

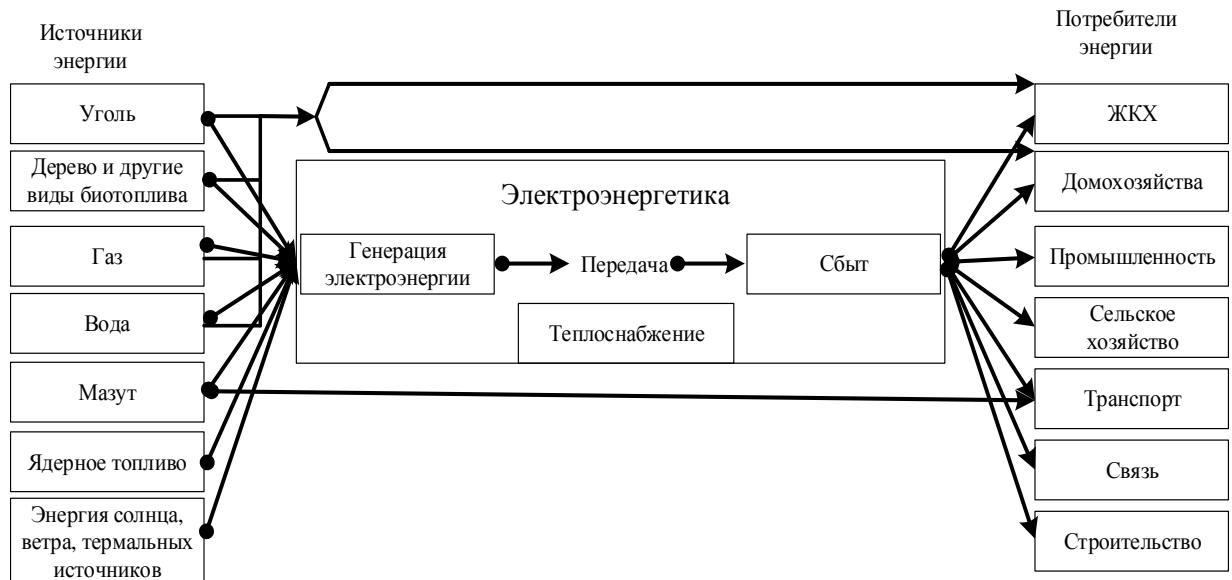


Рисунок 1.10 – Взаимосвязь объектов энергетики с другими отраслями экономики

Объекты энергетики рассредоточены по всей территории России и имеются на территории каждого ПСГ. Закономерно, что объекты энергетики в связи со своими значительными размерами должны находиться на территории, охраняемой более крупными пожарно-спасательными силами. Но и из этого общего правила имеются исключения, касающиеся удаления от крупных населенных пунктов значимых для энергетики страны объектов – АЭС и ГЭС. Характер обеспечения тушения пожаров на них отличается от пожаротушения на объектах энергетики, расположенных в крупных населенных пунктах, где в течение короткого промежутка времени могут быть сосредоточены значительные силы и средства пожарной охраны. Поэтому сосредоточение сил и средств для тушения пожара объекта энергетики следует сопоставлять с той частью сил и средств пожарной охраны, которые потребуются для обеспечения тушения данного пожара [54]. Удаленность основных видов объектов энергетики от центров сосредоточения крупных сил пожарно-спасательных гарнизонов приведена в таблице 1.2.

Расположение объектов энергетики с точки зрения сосредоточения сил пожарной охраны и сложности организации тушения пожара следует классифицировать следующим образом: разные (малые, средние, крупные) объекты энергетики в крупных пожарно-спасательных гарнизонах; крупные объекты энергетики в отрыве от крупных пожарно-спасательных гарнизонах; средние объекты энергетики в малых пожарно-спасательных гарнизонах; малые объекты энергетики в малых

пожарно-спасательных гарнизонах.

Таблица 1.2 – Удаленность объектов энергетики от центров сосредоточения крупных сил пожарной охраны

Вид объекта энергетики	Расположение	Наличие объектовой пожарной охраны (есть/нет)	Удаленность от ближайшего территориального ППО, км	Удаленность от крупных городов (центров субъектов РФ), км
1	2	3	4	5
АЭС, ГЭС	Обособленный объект вне поселения	+	5÷10	50÷200
ТЭЦ	Обособленный объект на территории поселения	+ / – *	1÷10	1÷20
ГРЭС	Обособленный объект на территории поселения	+ / –	1÷5	20÷100
Котельные (водогрейные, паровые)	Отдельное здание на территории поселения	–	1÷5	20÷200 и более
Малые котельные (объектовые, крышные)	Пристройка, встройка к зданию	–		
Малые котельные (объектовые, крышные)	Пристройка, встройка к зданию	–		
Поселковая котельная	Отдельное здание на территории поселения	–	1 ÷ 100 км	20÷200 и более
ДЭС (дизельная электростанция)	Отдельно стоящий блок-контейнер	–	1 ÷ 100 км	20÷200 и более
УРП (узловая распределительная подстанция)	Оборудование на открытой площадке и комплекс зданий	–	1÷5	20÷200 и более
ГПП (главная понижающая (понижительная) подстанция)	Оборудование на открытой площадке и комплекс зданий	–	1÷5	20÷200 и более
ПГВ (подстанция глубокого ввода)	Здание сложной планировки	–	1÷10	1÷20
ТП (трансформаторный пункт)	Малогабаритное закрытое сооружение	–	1÷5	20÷100
Встроенная подстанция (электрическая подстанция, занимающая часть здания)	Помещение или комплекс помещений, расположенный в зданиях различного назначения	–	1÷5	20÷100

Примечание: \* –объектовая пожарная охрана может быть и может отсутствовать.

Организацию сосредоточения СИС для тушения пожаров объектов энергетики в крупных пожарно-спасательных гарнизонах можно считать сбалансированной, так как ресурсов гарнизона в большинстве случаев бывает достаточно для локализации пожара даже на крупном объекте энергетики и время их сосредоточения находится в допустимых пределах, а техническое оснащение гарнизона позволяет осуществлять тушение пожаров на объектах энергетики в условиях воздействия ОФП и их сопутствующих проявлений (рисунок 1.11).

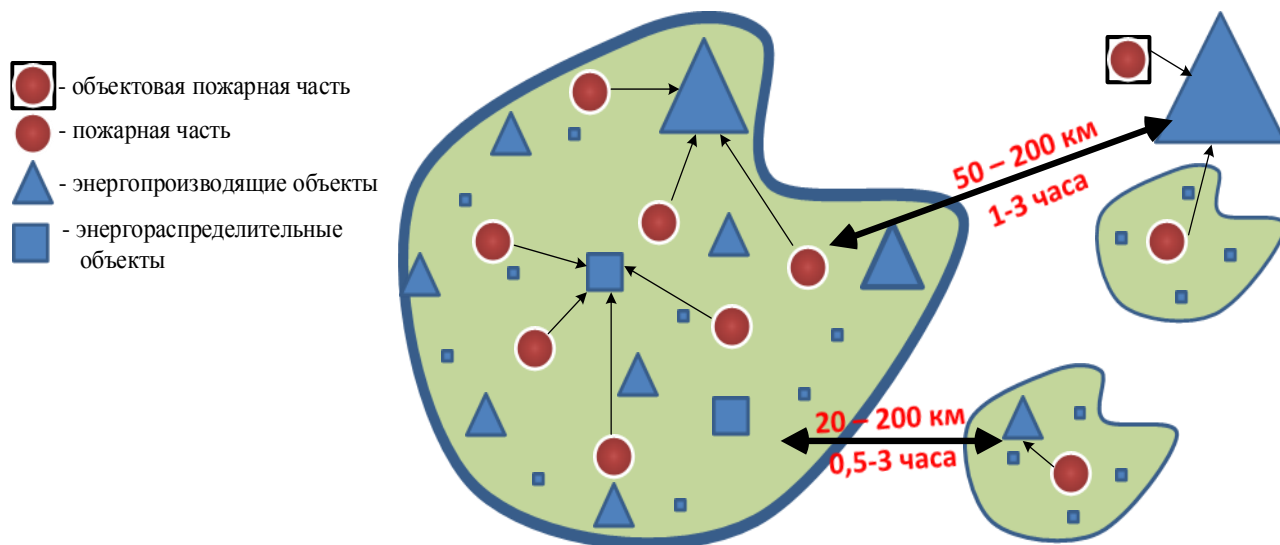


Рисунок 1.11 – Зависимость организации тушения пожара объекта энергетики от расположения сил и средств пожарно-спасательного гарнизона

Наибольшую сложность вызывают проблемы сосредоточения сил на крупных объектах энергетики, расположенных в отрыве от крупных гарнизонов, и средних объектах энергетики в малых гарнизонах. В этих случаях возникает критичный недостаток сил в стадии сосредоточения, приводящий к росту масштаба пожара. Сложность локализации пожаров малых объектов энергетики малыми гарнизонами, в основном, заключается в недостаточной готовности сил ПО и персонала объекта к тушению подобных объектов, в первую очередь, в части обеспечения безопасности (допуска к тушению). Своевременная локализация пожара любого объекта энергетики обеспечивается наиболее быстрым началом тушения пожара. В случае тушения ППО – их прибытием, выходом на позиции подачи ОТВ, а в дальнейшем – непрерывной подачей ОТВ при условии поступательного наращивания СИС ПО до требуемого уровня.

Своевременность тушения пожара следует рассматривать как способность локализовать пожар имеющимися СИС с возможно меньшими последствиями. От своевременности действий по локализации пожара зависит распространение пожара и масштаб, которые он может принять. Соответственно, чем быстрее начнутся действия по тушению, тем меньше вероятность перерастания пожара в более крупный.

Время прибытия ППО является одним из важных факторов, который влияет на конечный результат тушения пожаров. Согласно данным ФГБУ ВНИИПО МЧС России за 2009–2018 гг. [10] среднее время прибытия ППО на объекты энергетики составило 7,8 мин., причем на 15 % вызовов ППО прибывают позже установленного в техническом регламенте [17] времени. Несмотря на то, что время прибытия чаще всего менее нормативного [17], одно лишь своевременное прибытие не позволяет предотвратить развитие пожаров на объекте энергетики в более крупный, тем самым минимизировать ущерб.

Следующим этапом является подача ОТВ на тушение пожара. В соответствии с установленным порядком учета пожаров [55] время подачи первого ствола (в мин.) вычисляется как разность между временем подачи первого ствола и прибытия первого пожарного подразделения к месту пожара (загорания). Приказ [55] однозначно не определяет момент подачи, что позволяет трактовать его как развертывание рукавной линии, введение ствола в здание, вход звена ГДЗС в непригодную для дыхания среду, подачу ОТВ в рукавную линию. При этом следует сделать поправку на общую тенденцию снижения показателей реагирования на пожары. Определенное таким образом среднее время подачи первого ствола на объектах энергетики составило 3,2 мин. с момента прибытия первого подразделения. Например, произошедший в январе 2014 г. пожар на дизельной электростанции в Ямало-Ненецком автономном округе нанес прямой ущерб в 38,3 млн руб. Несмотря на то, что первые подразделения пожарной охраны прибыли через 3 мин. после сообщения о пожаре, быстро локализовать пожар и минимизировать ущерб от пожара не удалось. Сопутствующим фактором большого ущерба явился аварийный выброс



горючей жидкости и последующее ее горение, что сопровождалось сильным тепловым потоком и задымлением помещения пожара и смежных с ним, мешающим быстрой локализации и ликвидации пожара. Прямой ущерб от данного пожара составил почти треть годового ущерба от пожаров объектов энергетики. Из-за пожара была объявлена ЧС районного масштаба, так как районный центр с численностью населения более 7000 чел. остался без электроэнергии в условиях зимнего времени [56].

Наряду с минимизацией времени начала тушения пожара основополагающим для успешного выполнения задач по тушению является непрерывность тушения от момента подачи ОТВ до ликвидации пожара, подразумевающая своевременность сосредоточения необходимых сил и средств подразделений пожарной охраны в достаточном количестве для локализации пожара в тех размерах, которые он принял к моменту начала тушения. Это известная аксиома, на которой строится система тушения пожаров. Для объектов энергетики, ввиду их особого места в обеспечении благополучия населения, она должна соблюдаться в первоочередном порядке.

## **1.2 Проблематика тушения пожаров объектов энергетики**

Объекты энергетики в большинстве своем являются пожароопасными объектами, значительная часть оборудования которых располагается внутри зданий и сооружений. Проведен анализ пожаров на объектах энергетики с замкнутыми строительными объемами, к которым относятся [55]:

- здания энергоблоков (тепловые, гидравлические, атомные, дизельные) электростанций;
- здания и помещения котельных;
- здания компрессорных, газогенераторных, водородных и кислородных станций;
- здания для зарядки и обслуживания аккумуляторных батарей;
- электротрансформаторные подстанции;

– кабельные тоннели и галереи.

На рассматриваемых объектах энергетики, согласно статистическим данным, произошло 5 236 пожара. Основными причинами возникновения пожаров по данным за 2009–2018 гг. являлось: нарушение правил устройства и эксплуатации электрооборудования (73 %), неосторожное обращение с огнем (17 %), неисправность производственного оборудования, нарушение технологического процесса производства (11 %) [9–12].

Наиболее опасными технологическими процессами на энергопроизводящих предприятиях, приводящими к возникновению и развитию пожаров, являются обеспечение функционирования турбин и генераторов, что требует непрерывной подачи смазки, которая в большинстве случаев представляет собой органические и синтетические масла той или иной степени горючести. Широко применяющиеся органические нефтяные масла типов Л и УТ имеют температуру воспламенения около 370°C, между тем как температура свежесформованного пара может достигать 550°C. Таким образом, имеет место высокая вероятность возникновения пожара вследствие утечек масла через сальники, разрывы маслопроводов, неплотности фланцевых соединений и другие возможные пути с последующим попаданием на горячие поверхности. При этом рост мощности турбины соответствует более высокой температуре пара, а система регулирования требует большего давления масла, что повышает пожароопасность турбоагрегата. Все маслососы монтируются на нулевой отметке в конденсационном помещении, что снижает опасность возникновения и распространения пожара. Маслобак устанавливается на уровне отметки обслуживания турбины, чуть выше маслососов, что обеспечивает напор масла. Таким образом, повреждение масляных систем смазки может вызвать быстрое распространение возгорания и увеличение его площади. При нарушении герметичности трубопроводов возможен выброс масла под высоким давлением с образованием горящего факела достаточной мощности, который может привести к деформации и обрушению несущих конструкций машинного зала.

Характер распространения пожара в машинных залах зависит от причины возникновения горения. Наиболее опасны пожары, возникающие как следствие

взрывов, поскольку в таком случае возникает множество очаговых повреждений, инициирующих, в свою очередь, новые возгорания через растекание горящих жидкостей, короткие замыкания и т.д., кроме того, последствия усугубляются нарушением цельности арматуры вплоть до обрушения зданий.

Спецификой пожара, сопровождаемого горением масла, является растекание масла через неплотности и возникающие разрывы маслопроводов на нижерасположенные уровни машинного зала, включая кабельные каналы и полуэтажи. Кроме того, пламя охватывает маслопроводы и масляные емкости не только поврежденного агрегата, но и соседних, которые при перегреве могут повредиться и усилить пожар. Также происходит выделение большого количества дыма, затрудняющего оценку обстановки, нахождение участников тушения пожара в помещении и, следовательно, тушение пожара в целом [4].

При этом необходимо осуществлять постоянный контроль состояния других агрегатов, расположенных в машинном зале, но поскольку емкости маслосистем, насосы и маслопроводы находятся на нулевой отметке, то масло растекается и горит именно на этом уровне, тогда как генераторы и турбины со всеми приборами контроля и управления находятся выше, т. е. в зоне непосредственного воздействия дыма и пламени. Скорость распространения горения по площади при растекании масла может достигать  $25 \text{ м}^2/\text{мин}$  (без учета возможных фонтанов из маслопроводов высокого давления) [57].

Возгорание масла в трансформаторах может носить тлеющий характер и продолжаться значительное время, сопровождаясь выделением газообразных продуктов горения, в дальнейшем происходит короткое замыкание и переход возгорания на обмотки. При штатном срабатывании защиты происходит лишь местное выгорание обмотки, однако в противном случае возможны разрушения вплоть до срыва крышки трансформатора с выбросом масла наружу. Горение масла на трансформаторе опасно не только непосредственно воздействием огня, но и разрушением изоляторов и т. д., что может привести к подаче напряжения на корпуса оборудования, создать области с опасным шаговым напряжением на полу и т. д.

Пожары других маслonaполненных агрегатов (электрических распределительных и т.п.) сходны по характеру проявлений.

Исходя из вышесказанного, статистически наиболее значимы пожары с участием изоляционных материалов токоведущих частей энергоустановок, а в плане величины экономического ущерба – возгорания горючих жидкостей (и газов), что связано с увеличением площади пожара. Поэтому одной из актуальных проблем является разработка наиболее эффективных методов тушения турбинного масла и маслonaполненных кабелей на объектах энергетики. Для них характерны машинные залы с большой пожарной нагрузкой систем смазки, машинного масла, электроизоляции обмоток генераторов и т.д. При этом системы смазки имеют емкости с машинным маслом большой вместимости (10–15 т), а также насосов и маслопроводов высокого давления, где давление масла может достигать 1,4 МПа (14 кгс/см<sup>2</sup>). Согласно статистике, наибольший материальный ущерб наносят пожары, возникающие в результате выброса масла с последующим его воспламенением, поскольку в таких случаях огонь нередко охватывает значительную часть помещения и распространяется на расположенное в нем оборудование. Таким образом, наибольший ущерб приносят пожары в машинных залах энергетических комплексов.

Как следствие, методы тушения пожаров должны учитывать замкнутость помещений большого объема, а также возможность распространения возгорания как по площади машинного зала, так и через кабельное хозяйство (тоннели, полуэтажи и др.). Также необходимо учитывать высокую степень задымления при горении масла.

Турбогенераторы, а также синхронные компенсаторы мощностью выше 30 МВт имеют водородное охлаждение [58]. Несмотря на то, что непосредственно водород не горюч и устойчив к искрам в плане воспламенения, его смесь с кислородом (т.е. и с воздухом) взрывоопасна [59]. В системе водородного охлаждения используется специальная маслосистема, подающая масло к уплотнениям турбогенератора, предотвращающего утечку водорода из корпуса, через уплотнения вала, что повышает степень пожарной опасности в турбинном отделении. Разрушение

турбины такой конструкции приводит одновременно к проливу значительного количества масла, а также выбросу водорода, что практически неизбежно приводит к возникновению пожара. Более того, для таких возгораний характерно развитие аварийной ситуации по принципу «взрыв – пожар – взрыв – пожар» и т. д. При разрушении масляного уплотнения вала генератора возникает факел горения водорода с маслом температурой свыше  $2000^{\circ}\text{C}$ , что практически вдвое превышает максимальную температуру горения углеводородного пожара, на которую обычно рассчитана защита агрегатов. Значительная утечка водорода приводит к его скоплению в верхней части машинного зала, что опасно вероятностью мощного взрыва. Но даже если он не возникнет, обрушение незащищенных металлоконструкций может произойти буквально в течение одной минуты, т. к. критическая температура для них составляет всего  $500^{\circ}\text{C}$ .

Анализ возгораний в машзалах объектов энергетики, где применяется водородное охлаждение турбин, показывает, что 70% пожаров возникало вследствие механического разрушения узлов турбоагрегатов, а утечки водорода с последующим возгоранием и взрывом имели место в 18% случаев, что приводило к катастрофическим разрушениям и гибели обслуживающего персонала. Таким образом, при возникновении пожара в машинном зале важна каждая минута для сохранения несущей способности строительных конструкций, а следовательно, обнаружения возгорания и приведения в действие предусмотренных установок и средств [4].

Кабельные помещения объектов энергетики обладают не только повышенной пожароопасностью, но и трудностью тушения возгораний. Пожарная нагрузка (изоляция кабелей) в кабельных тоннелях может достигать  $30\text{--}60\text{ кг/м}^2$ . Возгорания в кабельных помещениях, как правило, сопровождаются высокой температурой с последующим разлетом искр расплавленного металла, множественными короткими замыканиями, которые сами являются источниками возгорания, и, как следствие, значительной скоростью распространения огня и дыма. При этом продукты горения часто содержат токсические вещества, что может вызвать дополнительные затруднения при тушении пожара и усилить его последствия. Следует учитывать

использование маслонаполненных кабелей, в которых кроме изоляции может гореть трансформаторное масло, которое находится в кабелях при избыточном давлении. Соответственно, при аварии оно может образовывать фонтаны и растекаться по кабельным тоннелям, значительно увеличивая площадь пожара и создавая угрозу возгорания и на других участках энергосетей [60].

Пожары на подстанциях могут возникать на трансформаторах, в кабельном хозяйстве и масляных выключателях. Крупные подстанции (районного масштаба) имеют масляные станции со значительным объемом трансформаторного масла (несколько десятков тонн). Пожары от места установки трансформатора могут распространяться далее, через распределительные щиты и кабельное хозяйство, создавая угрозу возгорания для других трансформаторов и установок. Также возможно короткое замыкание, которое с большой вероятностью вызовет в трансформаторе электрическую дугу. Это приведет к выделению из трансформаторного масла горючих газов, которые могут вызвать взрывы, способствующие разрушению трансформаторов и увеличению площади горящего масла. При тушении пожаров на электростанциях и подстанциях необходимо учитывать необходимость быстрого восстановления работы энергетического объекта, так как пожар может вызвать остановку многих объектов жизнеобеспечения населенных пунктов из-за перебоев в поступлении электрической энергии [61].

Как показано выше, сложность пожаров объектов энергетики характеризуется наличием большого количества электрооборудования под высоким напряжением, а также горючей нагрузки в виде турбинного, трансформаторного масла, изоляции кабелей. Крупные пожары на объектах энергетики чаще происходят в холодное время года, когда они работают с повышенной нагрузкой. Общий ущерб на объектах энергетики в значительной мере формируется от последствий крупных пожаров. Одним из важных факторов, способствующих развитию пожаров до крупных размеров, являются конструктивные особенности объектов энергетики.

Непрерывность тушения пожара обеспечивается как бесперебойной подачей ОТВ, так и возможностью пожарных осуществлять ее непрерывно на протяжении всего тушения пожара. Вполне естественно, что это должно быть гармонизировано

со своевременностью сосредоточения сил и средств для тушения пожара, поскольку речь идет об одном общем ресурсе – силах и средствах пожарно-спасательного гарнизона.

Организация тушения пожара на объекте энергетики подразумевает взаимосвязанное выполнение нескольких условий (рисунке 1.12).

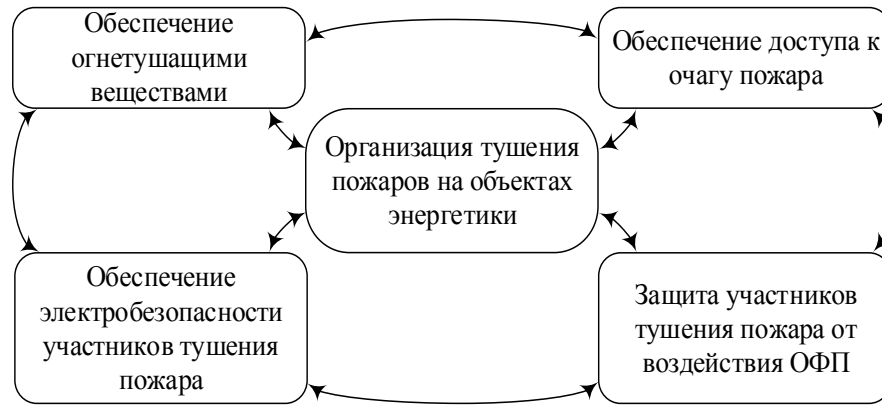


Рисунок 1.12 – Схема организации тушения пожаров на объектах энергетики

Рассмотрим детально условия, составляющие организацию тушения пожаров объектов энергетики.

### 1.2.1 Обеспечение электробезопасности участников тушения пожара

Применение таких ОТВ, как вода и пена, повышает риск получить травму от тока утечки при тушении электрооборудования, которое не было отключено и находилось под напряжением. Раздел «Требования охраны труда при проведении аварийно-спасательных работ на сетях электроснабжения» в приказе Министерства труда и социальной защиты РФ от 23 декабря 2014 г. № 1100н «Об утверждении Правил по охране труда в подразделениях федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы» [62] определяет, что токоведущие части электроустановок, находящихся под напряжением, отключаются (обесточиваются) и заземляются при пожаре работниками, эксплуатирующими электроустановку из числа оперативного или оперативно-ремонтного персонала, имеющих соответствующую квалификацию и допуск к работе, самостоятельно или

по указанию руководителя тушения пожара.

Электрические сети и установки напряжением выше 0,4 кВ отключают работники эксплуатирующей организации с выдачей письменного разрешения (допуска) к тушению пожара. Пожарные автомобили и пожарные стволы должны быть заземлены при подаче пены или воды на тушение электроустановки личным составом ФПС, участвующим в тушении пожара.

Тушение пожаров оборудования электростанций и подстанций, находящегося под напряжением до 0,4 кВ, которое по условиям технологии производства не может быть обесточено, разрешено выполнять без снятия напряжения с выполнением следующих условий:

а) невозможность снятия напряжения определяется эксплуатирующей организацией с доведением соответствующей информации до руководителя тушения пожара;

б) необходимость тушения пожара на элементах оборудования, находящегося под напряжением до 0,4 кВ на цепях вторичной коммутации, определяется эксплуатирующей организацией и подтверждается выдачей письменного допуска.

При возникновении пожара персоналом энергообъекта выдается письменный допуск на тушение энергетического оборудования, находящегося под напряжением до 0,4 кВ. Оборудование электростанций и подстанций, находящееся под напряжением выше 0,4 кВ, перед допуском к тушению пожара обесточивается.

Во всех случаях для оформления допуска или дополнительных мер электробезопасности требуется определенное время, которое будет приводить к задержке подачи ОТВ. При недостаточной координации действий объекта энергетики и пожарной охраны или отсутствии персонала объекта энергетики данное время может достигать десятков минут.

На объектах энергетики, особенно на атомных электростанциях, существует ряд помещений, в которых при отключении оборудования может произойти еще большая по масштабу чрезвычайная ситуация, чем пожар, так как это может повлиять на работу реактора. Поэтому нельзя исключать такого случая, при котором по-



жарным придется тушить оборудование, находящееся под напряжением. Как правило, тушение пожаров без снятия напряжения не допускается, за исключением случаев, когда напряжение не превышает 10 кВ и оборудование открыто для обозрения ствольщика [63].

Алешковым М. В., Колбасиным А. А. и Федяевым В. Д. проведен ряд исследований по определению безопасных расстояний для тушения электрооборудования под напряжением различными ОТВ [64–66]. Эти исследования показали, что при соблюдении определенных параметров (расстояние, напор на стволе) можно тушить электрооборудование, находящееся под напряжением, водой и водосодержащими ОТВ без ущерба для здоровья людей.

### **1.2.2 Защита участников тушения от воздействия опасных факторов пожара**

Защита участников тушения пожара осуществляется при помощи боевой одежды пожарного и снаряжения (шлем, сапоги, перчатки (краги)), теплоотражательных костюмов, СЗО ИТ от воздействия химически опасных веществ, СИЗОД изолирующего типа. Набор средств защиты позволяет осуществлять действия по тушению пожара в условиях воздействия практически любой концентрации дыма, опасных аэрозолей, газов и химически опасных веществ. Боевая одежда пожарного и теплоотражательный костюм защищают от воздействия повышенных температур в достаточно широких пределах, что делает возможным приближение к зоне горения на расстояние подачи ОТВ. Обеспечение пожарных комплектом средств защиты при выезде на пожар является обязательным условием и всегда выполняется. Следует заметить, что малочисленные пожарные подразделения, с численностью расчета менее трех человек, по условиям безопасности не оснащаются СИЗОД изолирующего типа.

Ресурс средств защиты, за исключением СИЗОД изолирующего типа, превосходит длительность пожара. Последние при длительной работе на пожаре прихо-

дится переснаряжать ввиду исчерпания времени защитного действия [67], что в некоторых случаях отрицательно влияет на непрерывность тушения пожара. Эта проблема в настоящем исследовании будет рассмотрена подробно. В остальном уровень средств защиты участников тушения пожара, осуществляющих работу в рамках соблюдения правил охраны труда, можно считать достаточным.

Большинство действий по тушению очага пожара происходит за счет подачи ОТВ с помощью ручных, лафетных и пенных стволов на предельно минимальном расстоянии, позволяющем производить подачу ОТВ в очаг пожара [68].

Пожар на объекте энергетики условно можно разделить на зоны с различными задачами и условиями рабочей среды [69]. В каждой из рабочих зон необходимо использовать изделия, предназначенные для специфики решения конкретных задач в определенных условиях работы. При установлении места очага горения, площади пожара, решающего направления и требующихся стволов на тушение, приступают к непосредственному тушению пожара. В данных условиях пожарным приходится работать в среде с тепловыми потоками высокой интенсивности. Наиболее надежным является использование термоагрессивостойких средств защиты (ТАСК), обеспечивающих защиту для пожарного при большом количестве теплоты до  $14 \text{ кВт/м}^2$ , выделяемом в процессе горения, а также имеющих безопасное конструктивное исполнение: предусматривается иллюминатор с защитным металлизированным покрытием, защитные рукавицы и бахилы, внутреннее расположение дыхательного аппарата и возможность обеспечения избыточного давления в подкостюмном пространстве.

Пожарным подразделениям, выполняющим работы на объектах энергетики, зачастую приходится работать в условиях ограниченного пространства с необходимостью преодоления узких мест для технологических переключений. В данных условиях ввиду необходимости работ в ограниченном пространстве используются облегченные средства защиты, прилегающие к фигуре человека и не стесняющие свободы движений, позволяющие преодолевать люки и лазы диаметром до 0,6 м. Конструкцией данных изделий предусмотрено, что средство индивидуальной защиты изолирующего типа одевается поверх изолирующего костюма.

Личный состав, задействованный в оцеплении территории, занимающийся прокладкой рукавных линий, водители специальной техники, сотрудники на посту безопасности и дегазации, а также прочий персонал, не подвергающийся прямому контакту с агрессивными опасными веществами, может использовать изделия с пониженными защитными показателями и менее экономически затратные, а также с возможностью использования противогозов с фильтрующими материалами, не оказывающими дискомфорт в специфике деятельности и имеющими более длительное время защитного действия [70].

В соответствии с требованиями [18] и [62] специальную защитную одежду изолирующего типа запрещается использовать с кислородно-изолирующим противогозом. Поэтому время выполнения работ и смена звеньев ГДЗС, работающих в непригодной для дыхания среде и (или) в зоне химического заражения, должны осуществляться с учетом времени защитного действия используемых СИЗОД и СЗО ИТ.

### **1.2.3 Обеспечение доступа к очагу пожара**

Весьма показателен факт, что на фоне снижения числа пожаров объектов энергетики возрастает применение пожарными средств защиты, обеспечивающих работу в условиях непригодной для дыхания среды (рисунок 1.13).

Это обстоятельство связано с возрастающей сложностью тушения на данных объектах, а именно с повышенным риском поражения электрическим током, большой горючей нагрузкой, сложной планировкой помещений и др. [71–73]. При этом в условиях задымления время на развертывание сил растет, тем самым увеличивая время начала подачи ОТВ [4, 74].

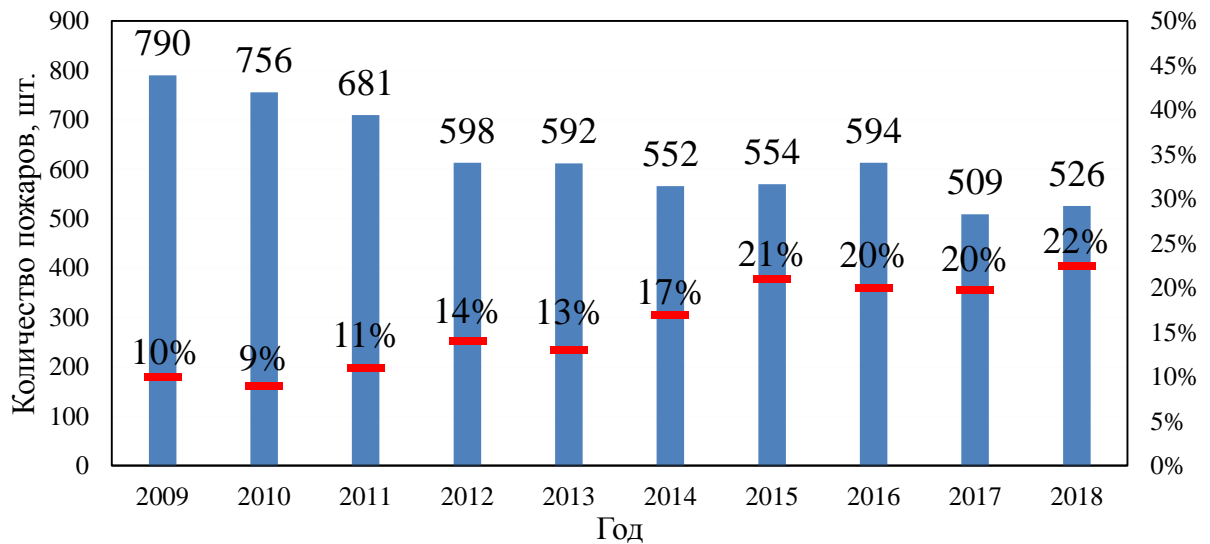


Рисунок 1.13 – Применение средств защиты органов дыхания (СИЗОД) пожарными при тушении пожаров на объектах энергетики за 2009–2018 гг.

■ – пожары; ■ – применение СИЗОД

Изучение пожаров объектов энергетики, потушенных с применением СИЗОД и без них, за 2009–2018 гг. в части спасенных людей, площади и ущерба от пожаров, не выявило устойчивых тенденций (рисунки 1.14–1.16).

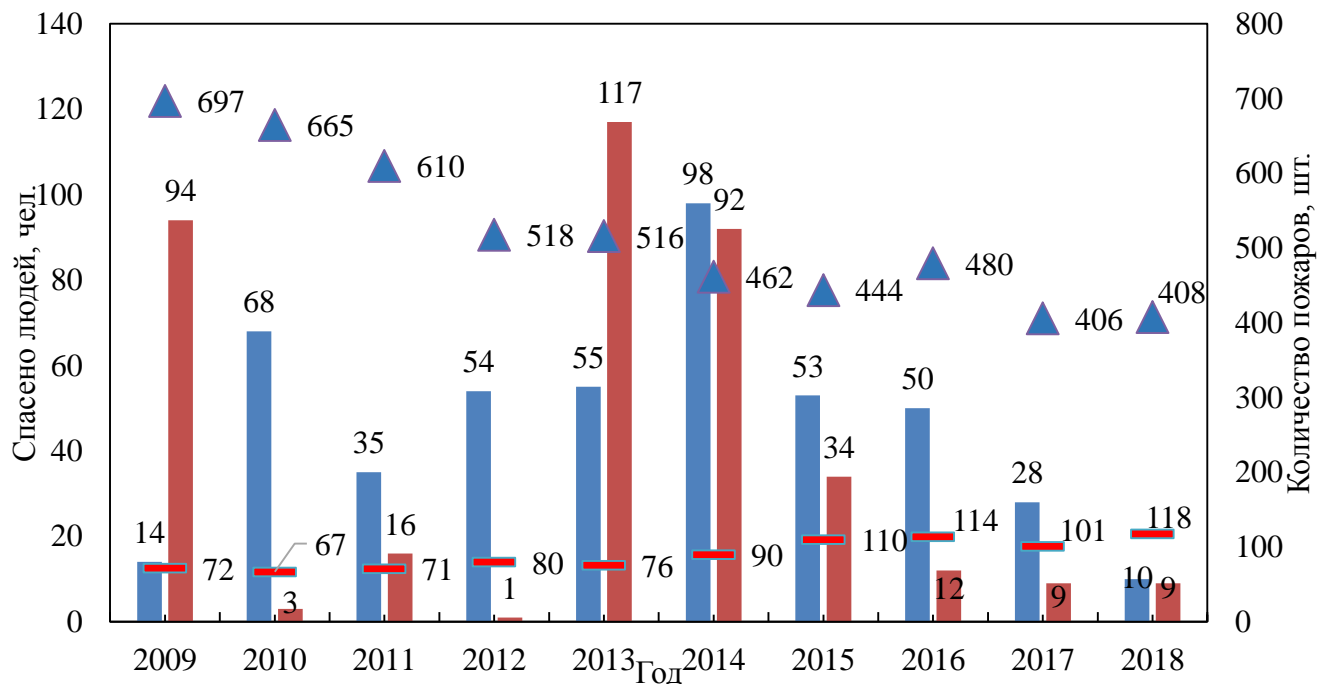


Рисунок 1.14 – Число спасенных людей на пожарах объектов энергетики, ликвидированных с СИЗОД и без СИЗОД:

■ – спасено людей на пожарах без применения СИЗОД; ■ – спасено людей на пожарах с применением СИЗОД; ▲ – пожары без СИЗОД; ■ – пожары с СИЗОД

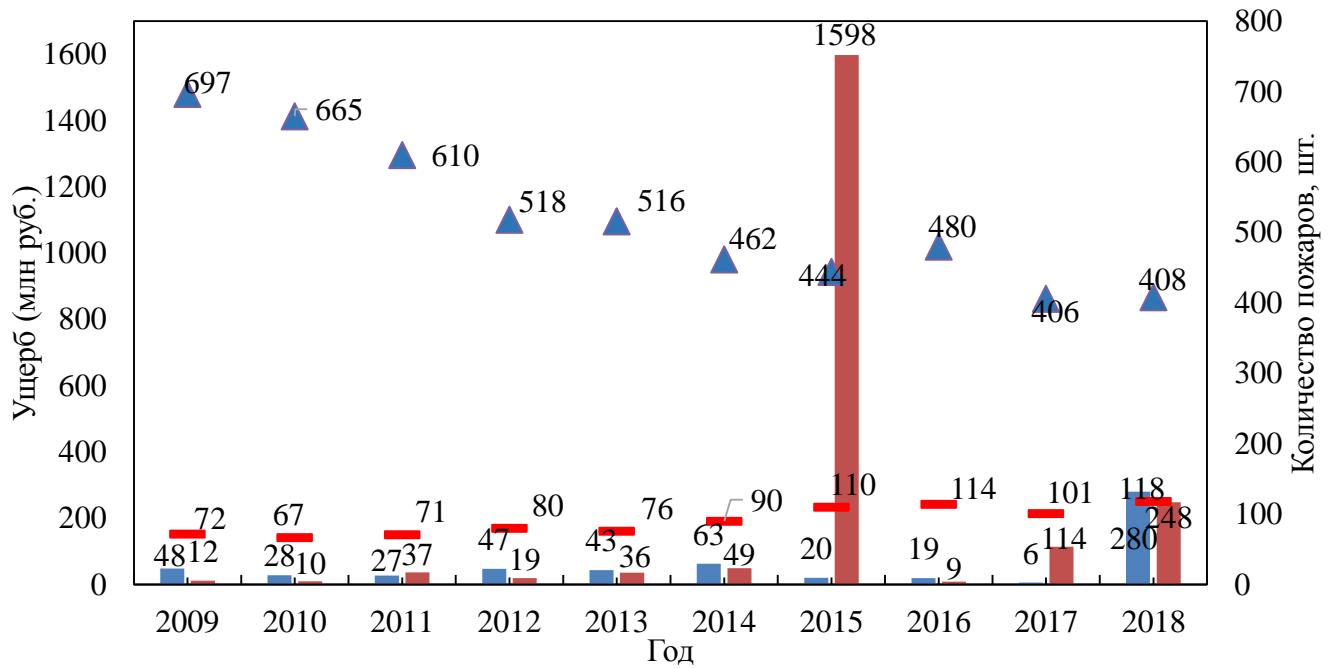


Рисунок 1.15 – Распределение ущерба от пожаров, ликвидированных с СИЗОД и без СИЗОД

- – ущерб от пожаров без СИЗОД (млн руб.);
- – ущерб от пожаров с СИЗОД (млн руб.);
- ▲ – пожары без СИЗОД; ■ – пожары с СИЗОД

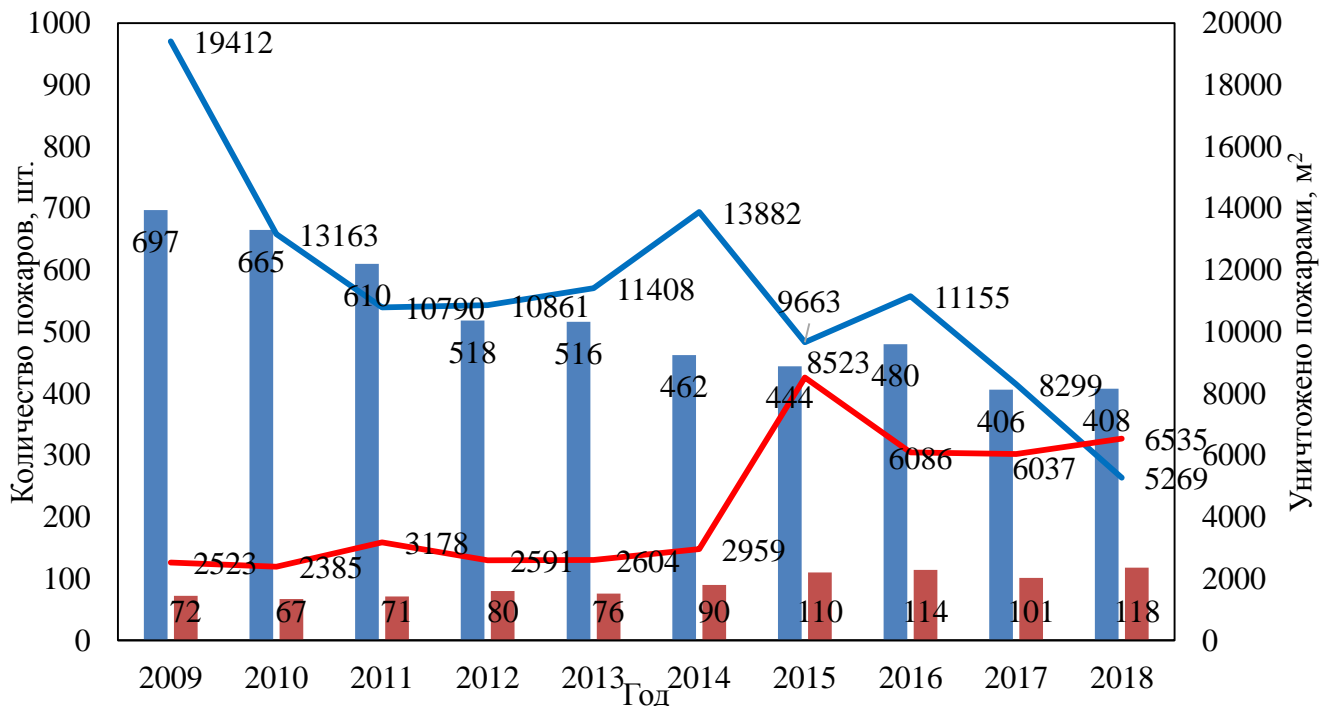


Рисунок 1.16 – Количество пожаров и уничтоженной площади:

- ▲ – уничтожено площади от пожаров без СИЗОД (млн руб.);
- – уничтожено площади от пожаров с СИЗОД (млн руб.);
- – пожары без СИЗОД; ■ – пожары с СИЗОД

При анализе было выявлено, что отдельный крупный пожар может оказать заметное влияние на общие показатели обстановки с пожарами объектов энергетики.

При дальнейшем анализе пожаров объектов энергетики за период с 2009 по 2018 гг. внимание уделялось тому, какая горючая нагрузка участвует в распространении пожара и какой средний материальный ущерб приносит пожар. В результате было выявлено, что наиболее характерными горючими нагрузками для объектов энергетики являются изоляция токоведущих частей и горючие жидкости (рисунок 1.17). Их объединяют общие пожароопасные свойства – в разы превышающая удельная скорость выгорания и высокая дымообразующая способность по сравнению с деревянными и бумажными изделиями. ГЖ на объектах энергетики находятся в трансформаторах, подшипниковых узлах турбин, маслопроводах. Их количество даже на небольших электростанциях исчисляется тоннами.

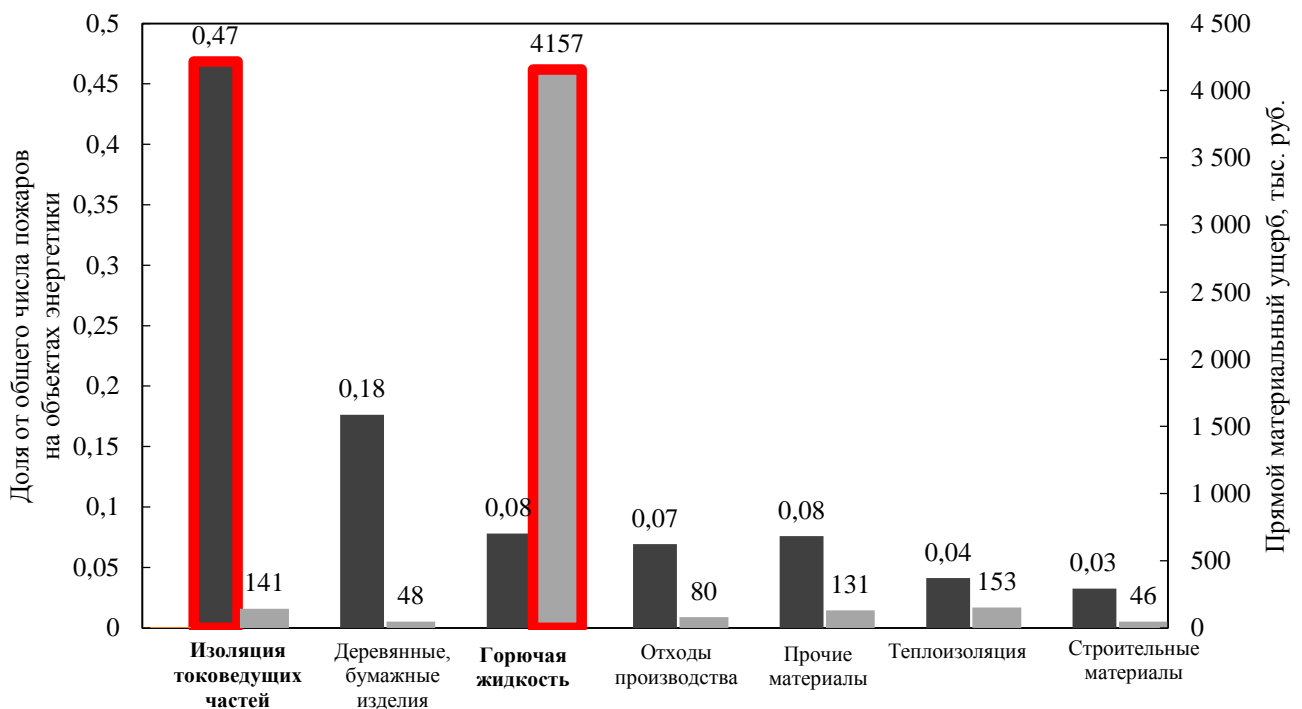


Рисунок 1.17 – Распределение пожаров по горючим материалам и среднему материальному ущербу от одного пожара с 2009 по 2018 гг.

- – доля от общего количества пожаров объектов энергетики;
- – средний ущерб от одного пожара объекта энергетики, тыс. руб.

В ходе проведения натуральных экспериментов на ТЭЦ-3 в г. Харькове [5] исследовалась динамика задымления в процессе развития пожара. Эксперимент проводился в машинном зале объемом 43000 м<sup>3</sup>. На нулевой отметке были расположены противни общей площадью 4,5 м<sup>2</sup>, заполненные турбинным маслом марки ТП-22. Его горение привело к снижению видимости до 1 м через 315 с.

Таким образом, пожары на объектах энергетики в замкнутых объемах с участием данных видов горючих нагрузок сопровождаются сильным задымлением даже при небольшой площади горения в большом объеме помещения. Если учесть, что с момента обнаружения пожара и введения первых стволов в среднем проходит 13,5 мин., то работа пожарных производится в условиях сильного задымления. Важно учитывать, что в данных условиях время выполнения задач пожарными подразделениями увеличивается, тем самым вероятность развития пожара повышается [75].

#### **1.2.4 Обеспечение огнетушащими веществами**

Следующим направлением организации тушения пожара объектов энергетики является обеспечение подачи ОТВ. Система бесперебойной подачи ОТВ складывается из противопожарного водоснабжения, стационарных и мобильных средств пожаротушения, обеспечивающих установленный расход на протяжении периода тушения пожара. Статистические данные показывают, что за период с 2011 по 2018 гг. в 75 % случаев пожары на объектах энергетики тушили водой, в 15 % случаев пеной различной кратности, а в остальных случаях применяли порошок (3,3 %), газ и газоаэрозольные составы (0,35 %), прочие ОТВ (6,35 %) [9–12].

Объекты энергетики, особенно крупные, в соответствии с требованиями пожарной безопасности [17] оснащаются противопожарным водоснабжением, способным в течение нормативного времени обеспечивать установленный расход ОТВ. Показателями, которые позволяют оценить достаточность ОТВ для тушения

пожара как в максимальном одномоментном сосредоточении сил, так и на протяжении времени тушения, являются превышение фактической интенсивности над нормативной и удельный расход ОТВ соответственно [76–78].

Под интенсивностью подачи ОТВ ( $J$ ) понимается их количество, подаваемое в единицу времени на единицу расчетного параметра пожара (площади, периметра, фронта или объема). Различают: линейную –  $J_l$  (л/(с·м), кг/(с·м)); поверхностную –  $J_s$  л/(с·м<sup>2</sup>), кг/(с·м<sup>2</sup>); объемную –  $J_v$  (л/(с·м<sup>3</sup>); кг/(с·м<sup>3</sup>)) интенсивности подачи. Численно требуемые интенсивности подачи ОТВ определяются на основе анализа статистических данных по потушенным пожарам и опытным путем, то есть требуемая интенсивность – эмпирическая величина.

Таким образом, интенсивность подачи ОТВ можно представить как:

$$J = \frac{Q_{ОВ}}{П_T \cdot \tau}, \quad (1.1)$$

где  $Q_{ОВ}$  – расход ОТВ за время проведения опыта или тушения пожара;

$П_T$  – величина расчетного параметра пожара;

$\tau$  – время проведения опыта или тушения пожара.

Наиболее часто в расчетах используется поверхностная интенсивность подачи (по площади пожара). Значения требуемой интенсивности подачи ОТВ, которыми пользуются при расчетах сил и средств, приводятся в соответствующей справочной литературе [76–79].

Расход ОТВ на расчетный параметр пожара за все время тушения называется удельным расходом и определяется по формуле:

$$Q_{уд} = \frac{Q_{г}}{П_T}, \quad (1.2)$$

где  $Q_{г}$  – расход ОТВ за время тушения;  $Q_{уд}$  – удельный расход.

Удельный расход ОТВ является одним из основных параметров тушения пожара. Он зависит от физико-химических свойств пожарной нагрузки ( $П$ ) и огнетушащих средств ( $W$ ), коэффициента поверхности пожарной нагрузки ( $K_{п}$ ), удельных потерь ОТВ ( $Q_{пот}$ ), которые происходят в процессе подачи его в зону горения и нахождения в ней:

$$Q_{уд} = f(П, W, K_{п}, Q_{пот}). \quad (1.3)$$



Фактический удельный расход ОТВ в некоторой степени позволяет оценить деятельность РТП и подразделений по тушению пожаров в сравнении с подобными по виду и классу пожарами. Снижение удельного расхода служит одним из показателей успешного тушения пожара. Фактический ( $Q_{\phi}$ ) и необходимый ( $Q_{н}$ ) удельные расходы определяются по формулам:

$$Q_{\phi} = q_{\phi} \tau_{\text{туш}}, \quad (1.4)$$

где  $q_{\phi}$  – фактический расход ОТВ в единицу времени;

$\tau_{\text{туш}}$  – время подачи ОТВ в зону горения.

$$Q_{н} = q_{\text{тр}} \cdot \tau_{\text{р}}, \quad (1.5)$$

где  $q_{\text{тр}}$  – фактическое, требуемое количество ОТВ, подаваемого в единицу времени (требуемый расход);

$\tau_{\text{р}}$  – расчетное время тушения.

Фактический удельный расход ОТВ представляет собой сумму необходимого удельного расхода ОТВ и его потерь ( $Q_{\text{пот}}$ ):

$$Q_{\phi} = Q_{н} + Q_{\text{пот}}. \quad (1.6)$$

Выражение (1.6) справедливо для всех принципов прекращения горения.

Количество ОТВ, необходимое для прекращения горения на расчетном параметре пожара, при условии, что оно полностью расходуется на прекращение горения, называется необходимым удельным расходом ( $Q_{н}$ ). На удельный расход влияет не только стадия развития пожара, свойства ОТВ, но и степень соприкосновения его с поверхностью горения.

В случаях, когда за расчетный параметр принимается площадь пожара, для более точного определения фактического удельного расхода ОТВ вводится коэффициент поверхности горения ( $K_{п}$ ):

$$Q_{\phi} = K_{п}(Q_{н} + Q_{\text{пот}}). \quad (1.7)$$

Коэффициент поверхности твердых горючих материалов уменьшается при изменении пожарной нагрузки прямо пропорционально, следовательно, увеличивается и удельный расход ОТВ. Кроме того, в реальных условиях процесс прекращения горения сопровождается сравнительно большими потерями ОТВ вследствие их разрушения и по другим причинам. Отношение фактического удельного расхода ОТВ к

необходимому называется коэффициентом потерь ( $K_{\text{пот}}$ ):

$$K_{\text{пот}} = \frac{Q_{\text{ф}}}{Q_{\text{н}}}. \quad (1.8)$$

Причиной потерь ОТВ могут быть отсутствие видимости зоны горения из-за задымления и воздействия высокой температуры как на ОТВ, так и на ствольщика, который не может приблизиться к зоне горения на необходимое для эффективной работы расстояние; отклонение струй ОТВ газовыми потоками или ветром; наличие в зоне горения скрытых от воздействия ОТВ поверхностей горючего материала и др.

Анализ тушения пожаров показывает, что фактически удельные расходы воды при тушении пожаров в гражданских и промышленных зданиях находятся в пределах  $400 \div 600$  л/м<sup>2</sup>. Если подойти к определению необходимого удельного расхода с позиции теплового баланса на внутреннем пожаре и принять, что за время свободного развития пожара выгорает примерно до 50 % пожарной нагрузки, то численное значение необходимого удельного расхода воды на охлаждение пожарной нагрузки, конструктивных элементов здания и нагретых газов составит  $80 \div 160$  л/м<sup>2</sup> там, где выполняются условия:

$$Q_{\text{ф}} \geq Q_{\text{н}}; \quad (1.9)$$

$$I_{\text{ф}} \geq I_{\text{тр}}, \quad (1.10)$$

где  $I_{\text{ф}}$  – фактическая интенсивность подачи ОТВ, подаваемого в единицу времени на единицу геометрического параметра пожара;

$I_{\text{тр}}$  – требуемая интенсивность подачи ОТВ, подаваемого в единицу времени на единицу геометрического параметра для прекращения горения.

Фактический удельный расход ОТВ не применяется непосредственно для расчета сил и средств, а востребован для определения фактической интенсивности подачи ОТВ при исследовании пожаров и в других случаях.

В практике пожаротушения целесообразно использовать такие интенсивности подачи ОТВ, которые могут быть реализованы существующими техническими средствами подачи и обеспечивают эффективность тушения с минимальными рас-

ходами ОТВ за определенное (оптимальное) время [76, 77, 79]. Для оценки достаточности ОТВ при пожарах объектов энергетики исследованы показатели удельного расхода и фактической интенсивности подачи на пожарах, произошедших с 2011 по 2018 гг. Расчет удельного расхода был произведен с учетом расхода, подаваемого на тушение пожара, времени тушения пожара (от подачи первого ствола до ликвидации открытого горения) и площади пожара:

$$Q_{\text{уд}} = \frac{q_{\text{ТП}} \cdot T_{\text{ОГ}}}{S_{\text{П}}}, \quad (1.11)$$

где  $q_{\text{ТП}}$  – расход ОТВ в единицу времени при тушении пожара;

$T_{\text{ОГ}}$  – время открытого горения;

$S_{\text{П}}$  – площадь пожара.

Превышение нормативной интенсивности ( $\Delta I$ ) было вычислено как отношение фактической интенсивности ( $I_{\text{Ф}}$ ) подачи к нормативной интенсивности ( $I_{\text{Н}}$ ), установленной для данного вида объектов или горючих веществ:

$$\Delta I = \frac{I_{\text{Ф}}}{I_{\text{Н}}}. \quad (1.12)$$

Исходя из того, что требуемая интенсивность и требуемый расход взаимосвязаны площадью пожара, то для оценки превышения подачи ОТВ на площадь пожара вполне обоснованно можно пользоваться превышением фактической интенсивности над нормативной.

Результаты обработки статистических данных, распределенных по классам функциональной пожарной опасности согласно [17] (Ф1 – здания, предназначенные для постоянного проживания и временного пребывания людей; Ф2 – здания зрелищных и культурно-просветительных учреждений; Ф3 – здания организаций по обслуживанию населения; Ф4 – здания образовательных организаций, научных и проектных организаций, органов управления учреждений; Ф5 – здания производственного или складского назначения), представлены на рисунках 1.18–1.19.

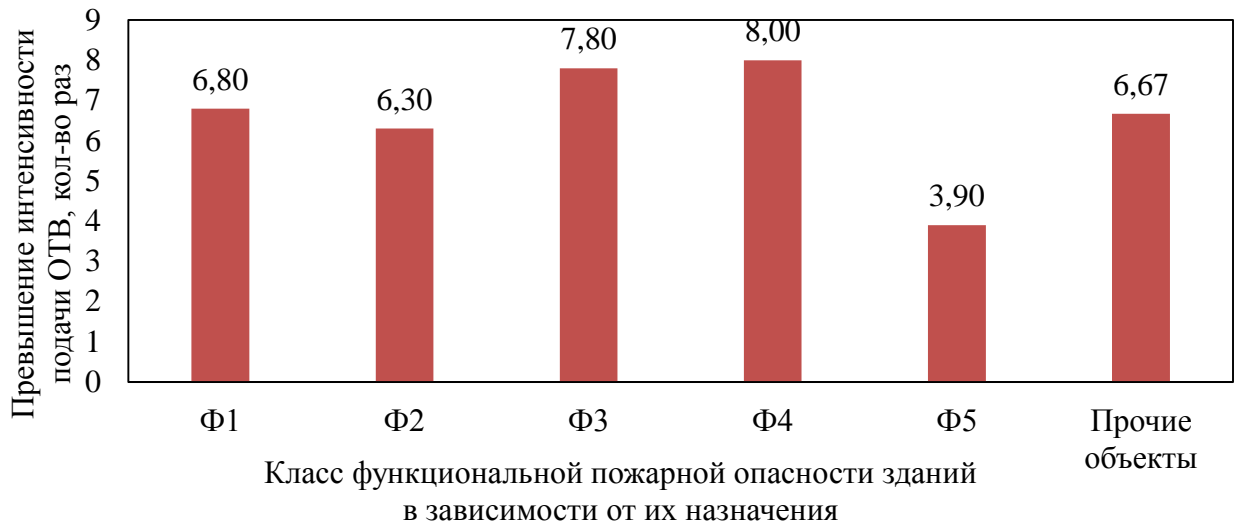


Рисунок 1.18 – Интенсивность подачи ОТВ при тушении пожаров за 2011–2018 гг.:



Рисунок 1.19 – Удельный расход ОТВ при тушении пожаров за 2011–2018 гг.:

■ – удельный расход ОТВ, л/м<sup>2</sup>

Разницу в отношении превышения интенсивности к удельному расходу ОТВ для зданий класса функциональной пожарной опасности Ф5 относительно показателей других классов функциональной пожарной опасности можно объяснить стилем руководства тушением пожаров, адаптированным к данному виду объектов, уже в начальной их стадии (по прибытии первых пожарных подразделений), так как для этих объектов предусмотрены объектовые ППО, а также в обязательном порядке составляются ПТП. Однако сложность тушения пожаров на данных объектах подтверждена одним из самых высоких показателей удельного расхода ОТВ.

Распределение превышения интенсивности и удельного расхода ОТВ среди промышленных предприятий в соответствии с принятой их градацией по отраслям [55] (таблица 1.3) представлено на рисунках 1.20 и 1.21, по помещениям объектов энергетики – на рисунках 1.22–1.26, отдельно по энергопроизводящим и энерготранспортирующим объектам – на рисунках 1.27–1.28.

Таблица 1.3 – Тип предприятия, организации, учреждения [55]

Тип предприятия, организации, учреждения	Код	Тип предприятия, организации, учреждения	Код
Предприятие электроэнергетики	11	Предприятие топливной промышленности	20
Предприятие черной металлургии	12	Предприятие цветной металлургии	21
Предприятие химической и нефтехимической промышленности	13	Предприятие транспорта	22
Предприятие машиностроения и металлообработки	14	Предприятие (организация) строительства	23
Предприятие лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности	15	Предприятие, организация жилищно-коммунального хозяйства	24
Предприятие промышленности строительных материалов	16	Предприятие судостроения и судоремонта	25
Предприятие легкой промышленности	17	Предприятие по производству лекарственных препаратов	26
Предприятие пищевой промышленности	18	Предприятие угольной промышленности	27
Предприятие сельскохозяйственного назначения	19	Прочие предприятия производственного назначения	30
Предприятие топливной промышленности	20	Складское предприятие, база, хранилище	31

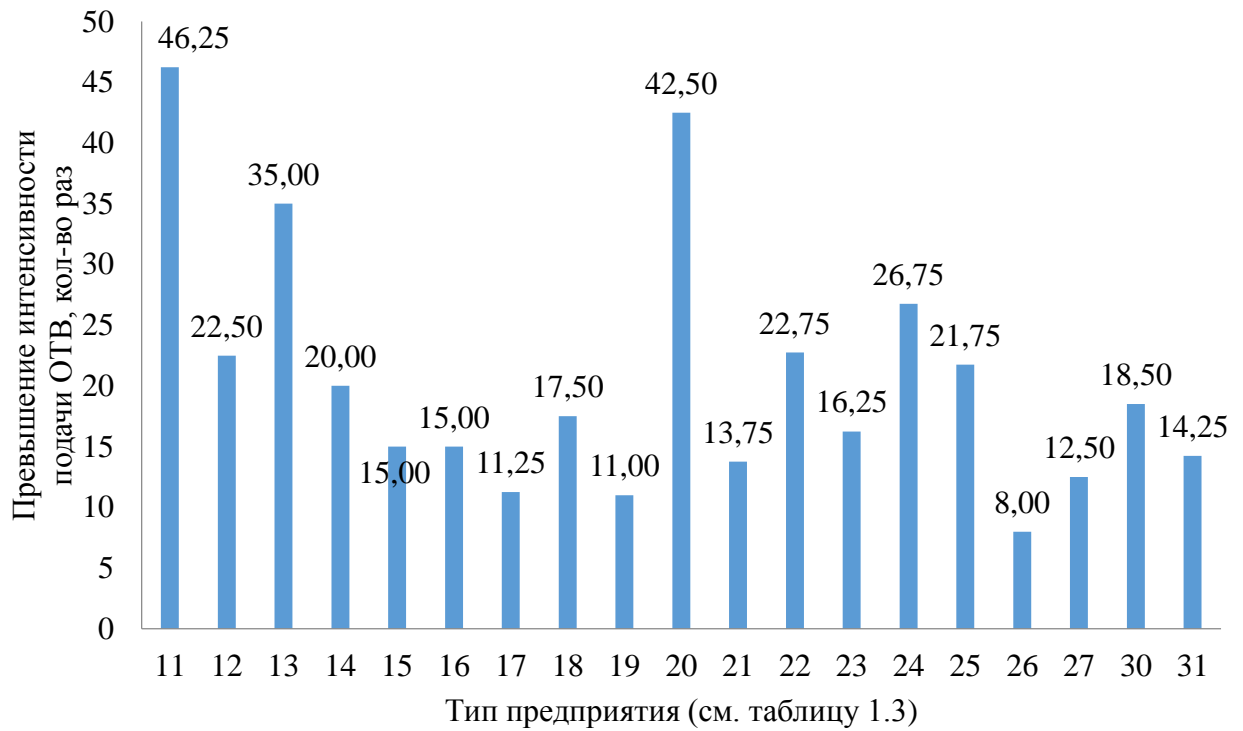


Рисунок 1.20 – Превышение интенсивности подачи ОТВ при тушении пожаров в 2011–2018 гг.

■ – превышение интенсивности подачи ОТВ

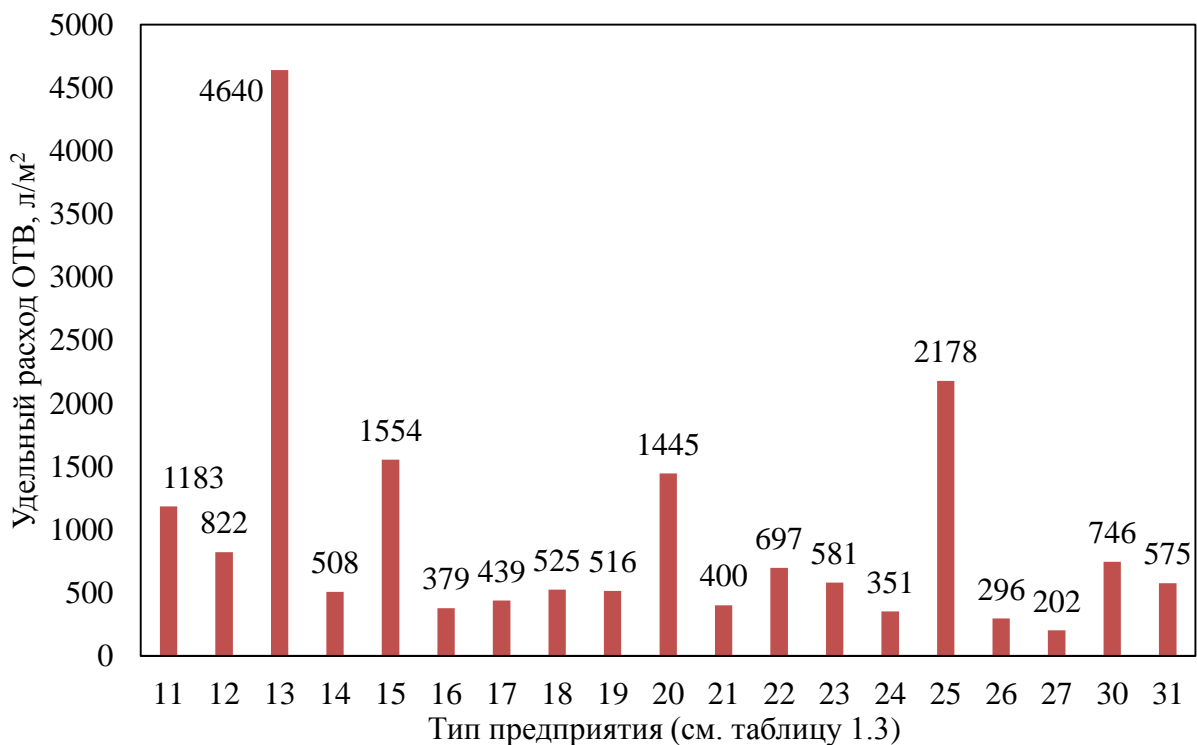


Рисунок 1.21 – Превышение удельного расхода ОТВ при тушении пожаров в 2011–2018 гг.

■ – удельный расход ОТВ

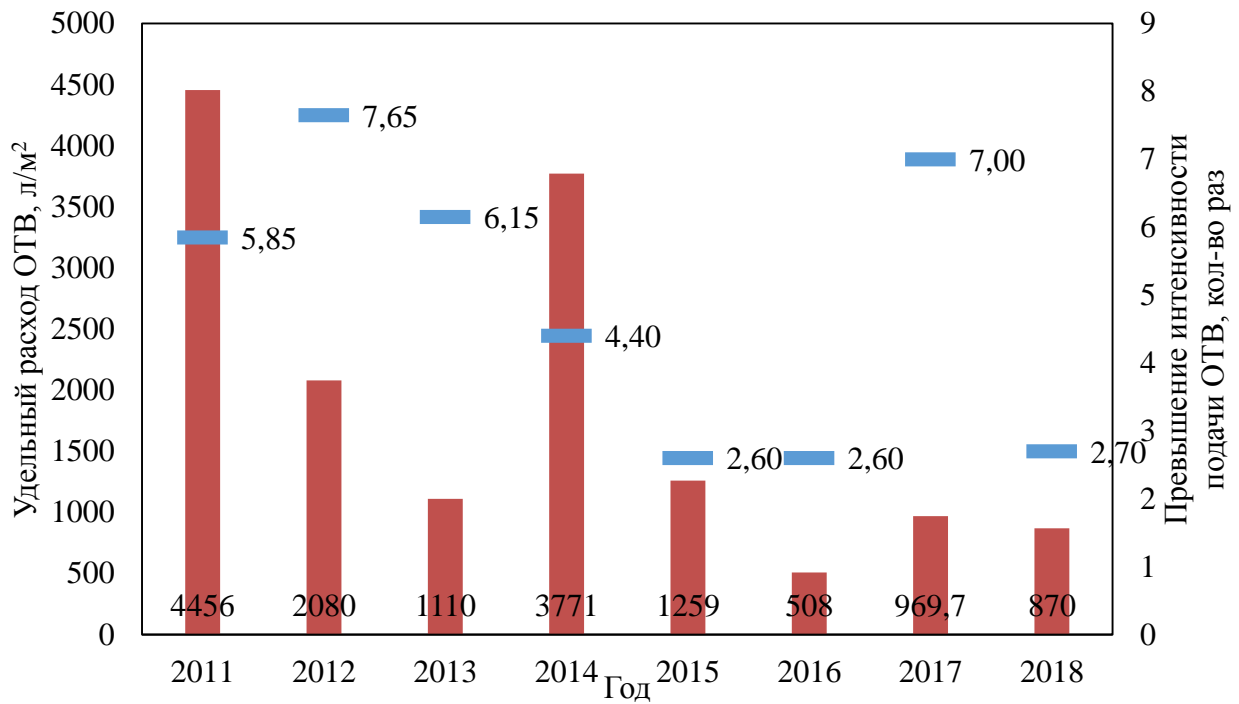


Рисунок 1.22 – Удельный расход и превышение интенсивности подачи ОТВ при тушении зданий энергоблока тепловой или гидравлической электростанции

за 2011–2018 гг.: ■ – средний удельный расход ОТВ, л/м<sup>2</sup>;

■ – превышение интенсивности подачи ОТВ

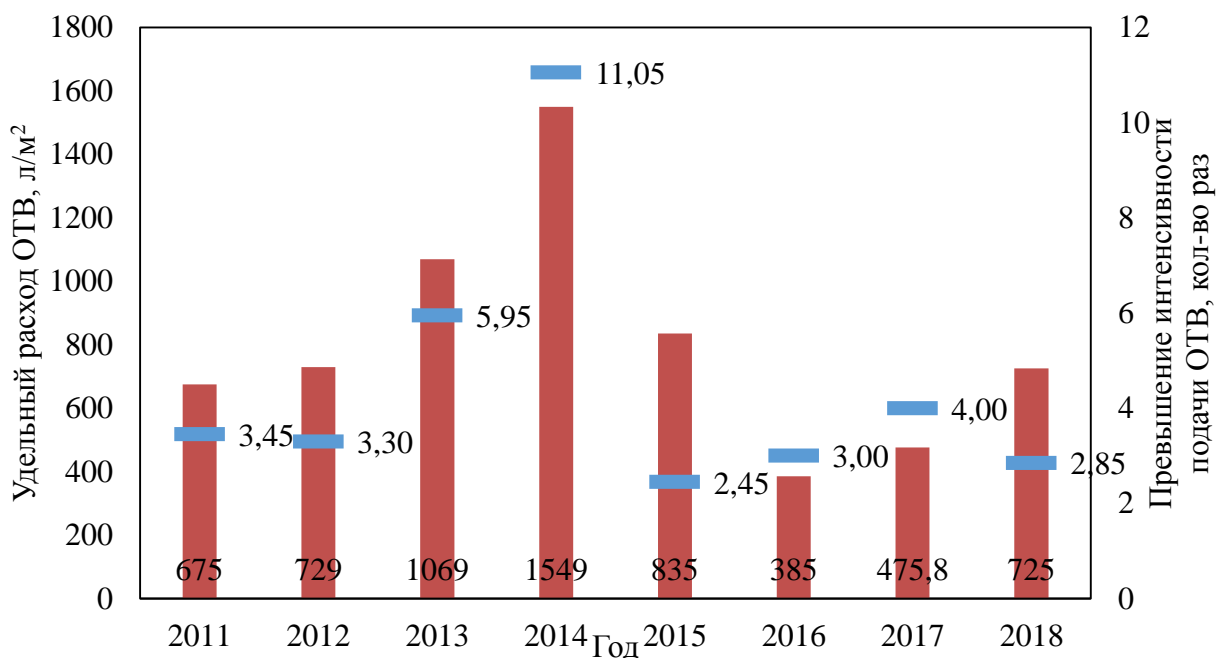


Рисунок 1.23 – Удельный расход и превышение интенсивности подачи ОТВ

при тушении зданий дизельной электростанции за 2011–2018 гг.:

■ – средний удельный расход ОТВ, л/м<sup>2</sup>;

■ – превышение интенсивности подачи ОТВ

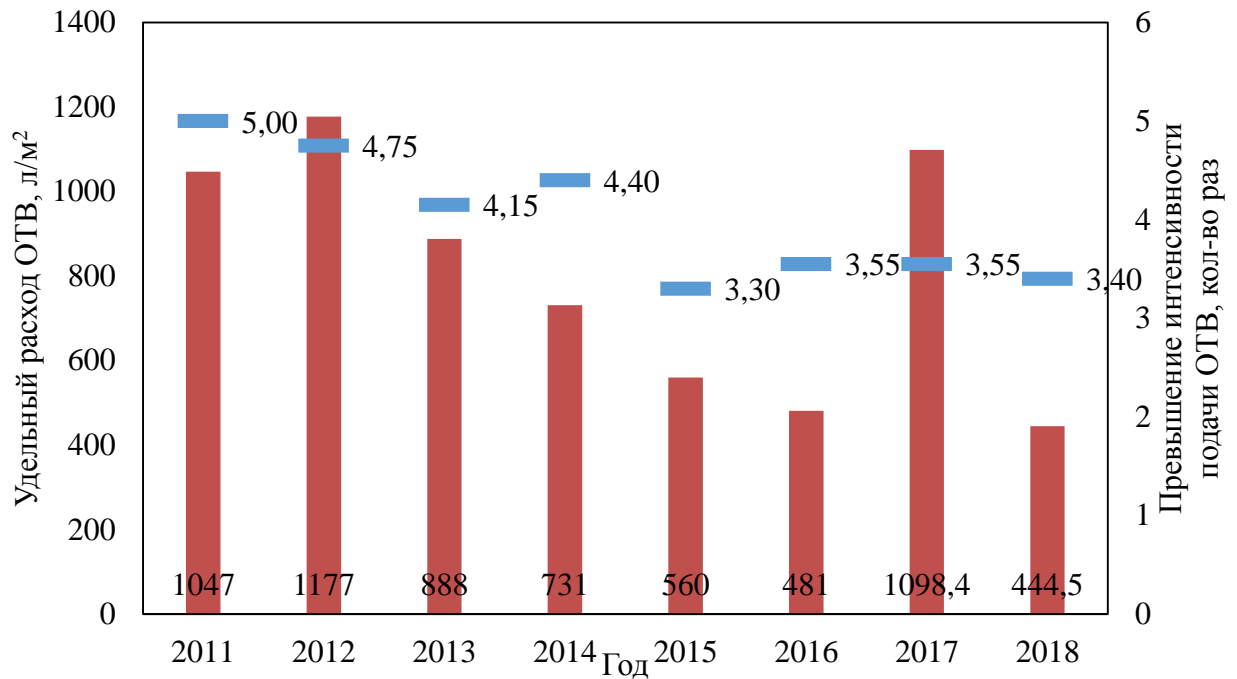


Рисунок 1.24 – Удельный расход и превышение интенсивности подачи ОТВ при тушении зданий котельной за 2011-2018 гг.

■ – средний удельный расход ОТВ, л/м<sup>2</sup>;  
 ■ – превышение интенсивности подачи ОТВ

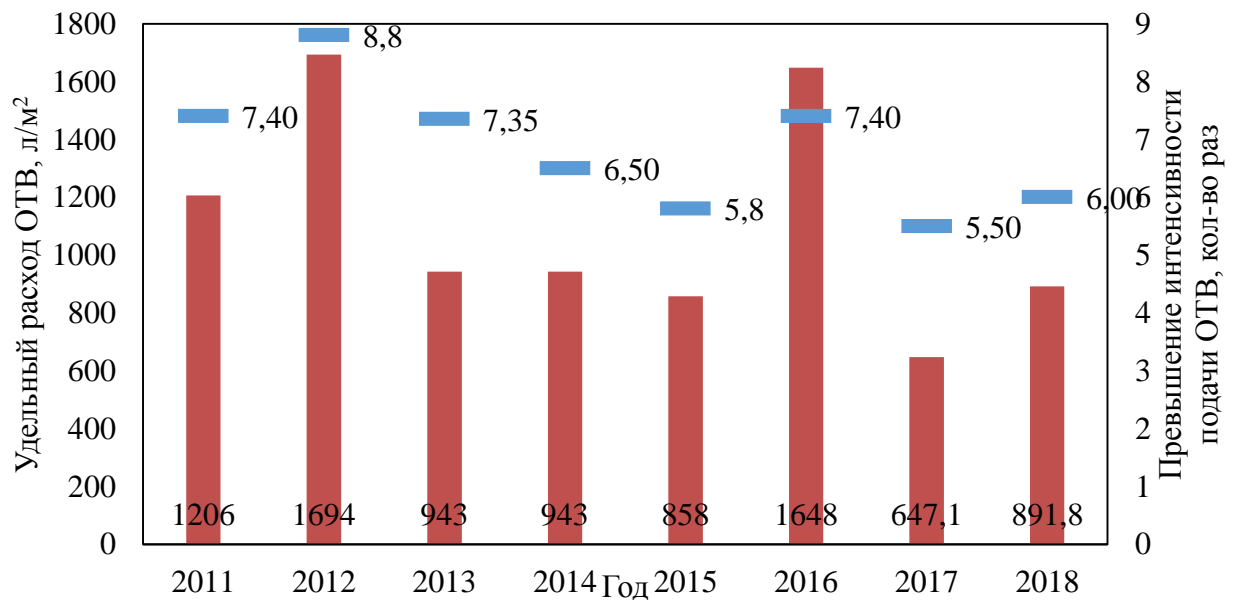


Рисунок 1.25 – Удельный расход и превышение интенсивности подачи ОТВ при тушении электротрансформаторных подстанций, трансформаторов, электродизельных установок за 2011–2018 гг.:

■ – средний удельный расход ОТВ, л/м<sup>2</sup>;  
 ■ – превышение интенсивности подачи ОТВ



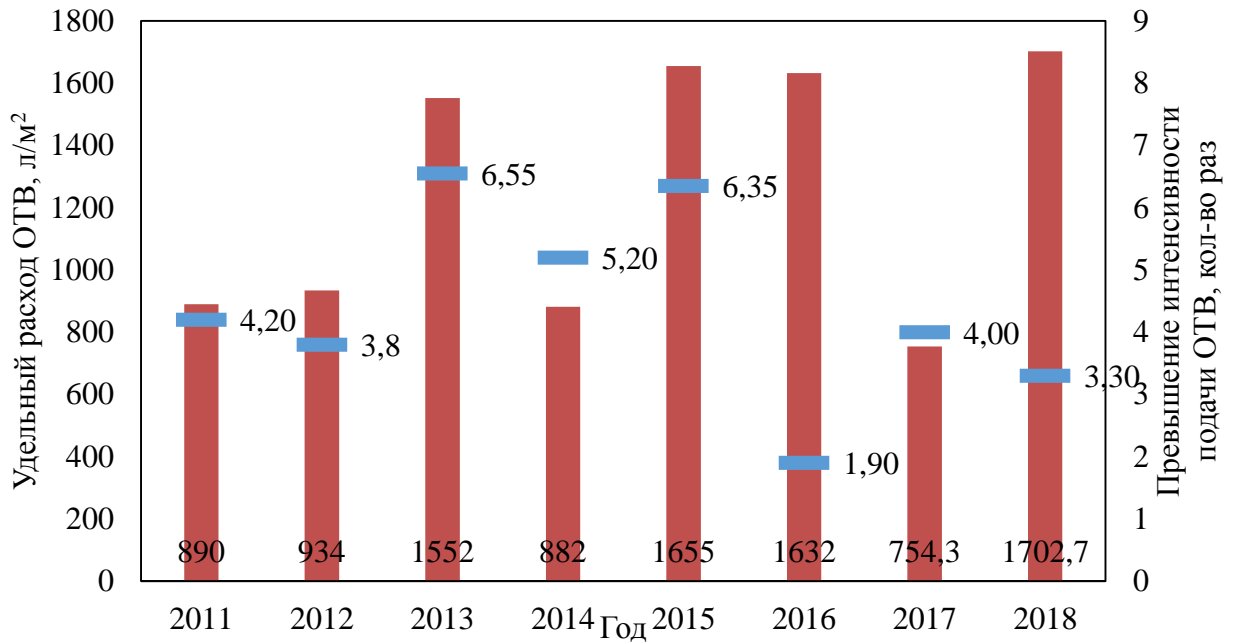


Рисунок 1.26 – Удельный расход и превышение интенсивности подачи ОТВ при тушении кабельных тоннелей, галерей за 2011–2018 гг.

■ – средний удельный расход ОТВ, л/м²;

■ – превышение интенсивности подачи ОТВ

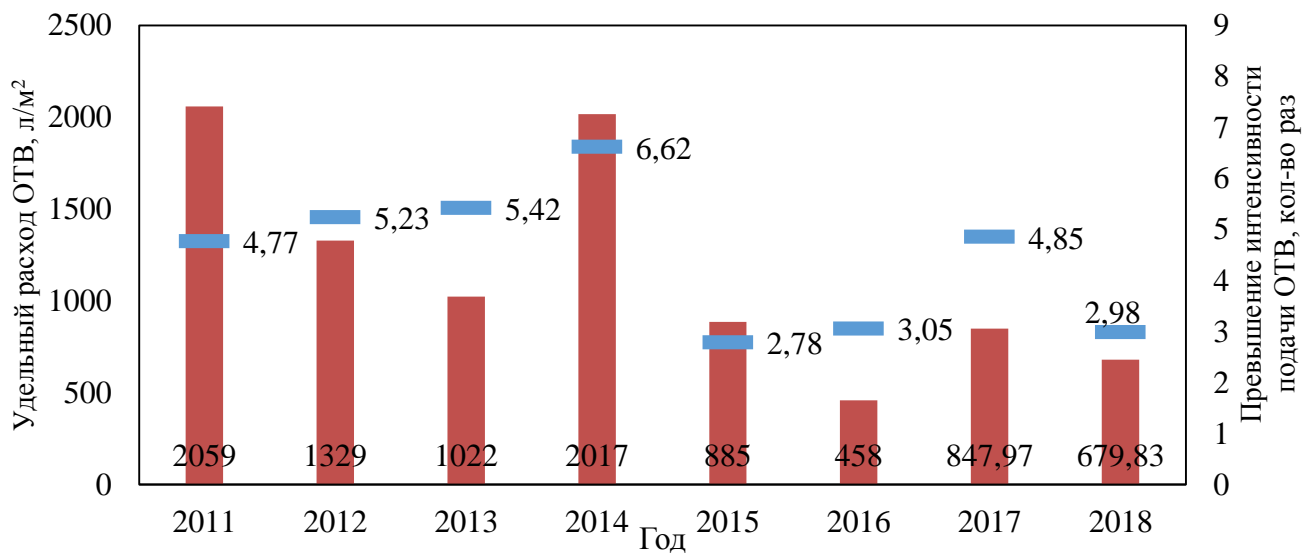


Рисунок 1.27 – Удельный расход и превышение интенсивности подачи ОТВ при тушении энергопроизводящих объектов за 2011–2018 гг.:

■ – средний удельный расход ОТВ, л/м²;

■ – превышение интенсивности подачи ОТВ

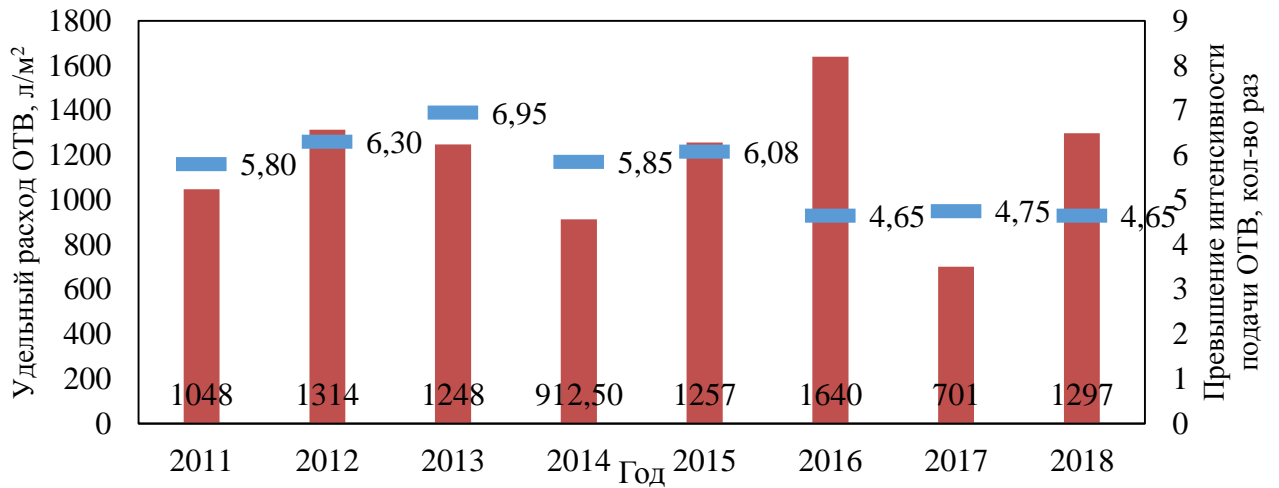


Рисунок 1.28 – Удельный расход и превышение интенсивности подачи ОТВ при тушении энерготранспортирующих объектов за 2011–2018 гг.:

- – средний удельный расход ОТВ, л/м<sup>2</sup>;
- – превышение интенсивности подачи ОТВ

Превышение требуемой интенсивности подачи и высокие значения удельного расхода ОТВ свидетельствуют о достаточной обеспеченности объектов энергетики ОТВ и средствами их подачи. В то же время характер превышения этих показателей говорит о сложности подачи ОТВ непосредственно в зону горения на фоне достаточности ОТВ. Излишнее расходование ОТВ обусловлено в значительной степени скрытостью зоны горения от пожарных за дымом.

### 1.3 Научные проблемы моделирования тушения пожаров объектов энергетики

Основой для моделирования тушения пожаров объектов энергетики является прогноз развития пожара. Колоссальный объем исследований в этом направлении был проведен такими учеными, как Пузач С. В., Рыжов А. М., Хасанов И. Р., Карпов А. В., *K. McGrattan, B. Klein, D. B. Spalding* и *S. Welch P. Rubini* [80–88].

Общей задачей данного направления исследований является прогнозирование динамики ОФП в целях определения степени их воздействия на организм человека для последующего проведения своевременной эвакуации при пожаре, а также на строительные конструкции зданий и сооружений для определения характера развития пожара. Путем математических расчетов устанавливаются термодинамическая картина пожара (обстановка на пожаре) и критическая продолжительность пожара, определяются времена достижения ОФП критических значений, опасных для жизни и здоровья человека, предельных состояний строительных конструкций. Другими словами, проводимые расчеты направлены на определение временных показателей, необходимых для безопасной эвакуации людей из зданий и сооружений при пожарах.

В настоящее время применяются различные математические модели расчета динамики развития ОФП, иначе говоря, развития пожара, регламентированные соответствующими нормативными документами [32], [33] (рисунок 1.29).

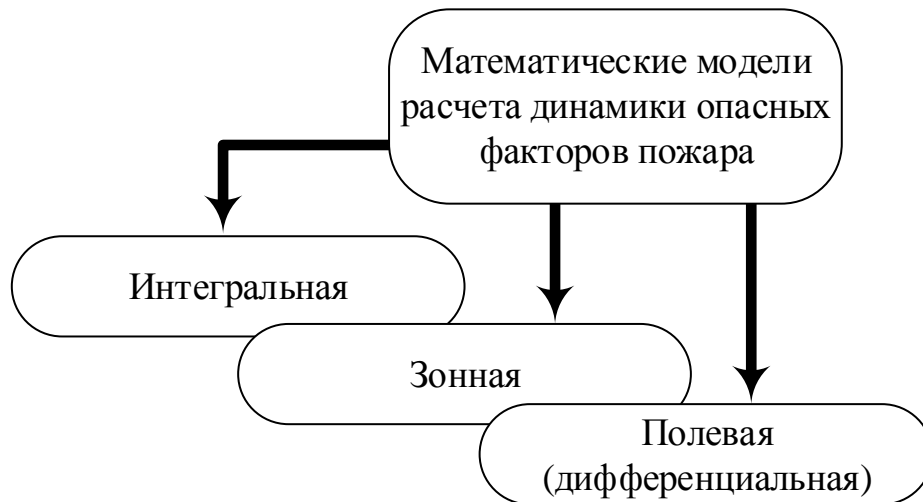


Рисунок 1.29 – Математические модели для расчета динамики ОФП

Каждая из представленных на рисунке 1.29 математических моделей имеет свою область применения в зависимости от уровня детализации термогазодинамической картины пожара.

Так, интегральная модель развития пожара используется для описания развития пожара на уровне среднеобъемных параметров (температура, плотность, массовые концентрации кислорода, токсичные продукты горения, ОТВ и оптическая концентрация дыма, а также средние температуры ограждающих конструкций и

усредненные характеристики теплогазообмена через проемы). Моделирование основывается на законе сохранения масс, первом законе термодинамики, и эмпирических зависимостях. Модель предназначена для расчета динамики ОФП:

- для зданий и сооружений, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;
- при проведении имитационного моделирования для случаев, когда учет стохастического характера пожара является более важным, чем точное и детальное прогнозирование его характеристик;
- для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерным размером помещения.

Основным преимуществом интегральной модели развития пожара является быстрый и низкотрудоемкий расчет динамики ОФП. Основным недостатком является необходимость использования дополнительной экспериментальной информации или моделей более высокого уровня (зонных или полевых) для получения распределения параметров теплообмена по объему помещения. Интегральную модель развития пожара используют только в помещениях высотой до 6 м [80]. Практическое использование программ, основанных на интегральной модели, показывает, что получаемые значения являются среднеобъемными величинами, которыми в полной мере невозможно описать термогазодинамическую картину пожара.

При расчетах с использованием зонной модели развития пожара исследуемый объем разбивается на зоны. Наиболее популярной и используемой при расчетах является трехзонная модель, при которой объем разбивается на: зону припотолочного дымового слоя; зону конвективной колонки; зону холодного воздуха.

В пределах каждой из зон газовая среда описывается на уровне усредненных параметров [80]. К основным преимуществам зонной модели относятся:

- быстрый и низкотрудоемкий расчет динамики ОФП;
- использование закономерностей теплового и гидродинамического взаимодействия струйного течения со строительными конструкциями с условным разбиением на характерные области (критическая точка, область ускоренного течения, переходная область и область автомодельного течения).

К недостаткам модели можно отнести:

- необходимость использования дополнительной экспериментальной информации или модели более высокого уровня (полевой модели) для получения распределения параметров теплообмена по объемам зон помещения;

- в случае сложной термогазодинамической картины пожара основные допущения зонной модели (равномерно прогретый припотолочный слой и т.д.) не соответствуют реальным условиям.

Зонную математическую модель используют для расчета динамики ОФП для:

- помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой;

- помещений большого объема, когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;

- рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и т.п.).

Полевая (дифференциальная) модель развития пожара основывается на вычислении гидродинамики (*computational fluid dynamics – CFD*), при этом исследуемый объем делится на ряд элементарных объемов с конечными размерами (метод конечных элементов). Полевые (дифференциальные) модели дают наиболее подробное описание процессов теплообмена при пожаре в помещениях. Основным их достоинством является то, что искомыми параметрами являются поля температур, скоростей, давлений, концентраций компонентов газовой среды и частиц дыма по всему объему помещения. Полевые модели наиболее сложны в математическом описании, так как они состоят из системы трех- или двумерных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных. Полевая (дифференциальная) модель применяется с целью расчета динамики развития ОФП для:

- помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (атриумы с системой галерей и примыкающих коридоров, многофункциональные центры со сложной системой вертикальных и горизонтальных связей и т.д.) [81];

- помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше

(меньше) остальных (тоннели, закрытые автостоянки большой площади и т.п.);

– иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (распространение пожара по фасаду здания, уникальные сооружения, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара, и т.п.).

Полевая модель развития пожара чаще всего применяется в научных и прикладных исследованиях в связи с развитием электронно-вычислительной техники и программного обеспечения, которые позволяют использовать сложный алгоритм для проведения расчетов.

Из числа современных программных комплексов, реализующих полевую модель развития пожара, следует отметить такие, как FLUENT, COMSOL, Multiphysics, ANSYS CFX, STAR-CD. К специализированным программным комплексам можно отнести: Fire Dynamics Simulator (FDS) [82], PHOENICS [83], SOFIE [84], SMARTFIRE, JASMINE, KOBRA-3D [85–87].

Указанные модели весьма подробно описывают процесс развития пожара, и их высокий уровень подобия не вызывает сомнения, однако ни в одной из них не ставилась задача учета воздействия ОТВ в процессе тушения пожара оперативными ППО. Это вполне объяснимо областью исследований, для которых создавались указанные модели.

Следует отметить, что процесс тушения пожара оперативными ППО значительно изменяет процесс свободного развития пожара и вносит в динамику пожара дополнительные факторы, которые усложняют расчетную модель. К ним относятся:

– дополнительные проемы, изменяющие газообмен и конфигурацию в ходе тушения пожара;

– искусственное управление газовыми потоками, которое применяют пожарные для снижения воздействия ОФП;

– воздействие ОТВ, которое в большинстве случаев имеет комбинированный характер, реализуя несколько способов прекращения горения.

Учет данных факторов в расчетах динамики пожара повышает многофакторность и трудоемкость расчетов на фоне неопределенности начала отдельных действий по тушению на временной шкале. Следует отметить, что реализация методик расчета динамики пожара стала возможна с ростом производительности электронно-вычислительной техники, но даже при современном уровне развития может занимать достаточно продолжительное время.

Совокупность указанных обстоятельств позволяет сделать вывод, что в настоящее время в полной мере не разработаны и не реализованы модели динамики пожара в процессе тушения до ликвидации горения.

Данные обстоятельства привели к разработку и созданию укрупненного метода расчета динамики развития и тушения пожара, ставшего основой модели, используемой в пожарной тактике. Прогнозирование развития пожара и механизм его тушения во времени исходит из условий и понятий, ставших уже классическими в пожарной тактике, основателями которой были П. Г. Демидов, И. Ф. Кимстач, П. П. Девлишев, Я. С. Повзик, Н. С. Холошня, В. П. Иванников, П. П. Ключ [89–93].

Развитие пожаров и результаты их тушения определяются масштабами пожаров, продолжительностью их локализации и ликвидации, и представляются набором следующих факторов:

- вид и размеры пожара к моменту введения сил и средств;
- площадь пожара при локализации;
- продолжительность свободного развития пожара;
- продолжительность тушения;
- вид и количество использованных сил и средств, а также способы их расстановки.

Модель развития пожара основывается на понятии скорости распространения пожара по различным горючим материалам или объектам пожара. Модель тушения пожара строится на понятии интенсивности подачи ОТВ приборами подачи (стволами), достаточной для прекращения горения на участке (площади) подачи. Сочетание этих моделей позволяет получить значение расхода ОТВ, достаточного для локализации и ликвидации горения с последующим его переводом в состав сил

и средств пожарной охраны, который необходимо сосредоточить на месте пожара в определенное время. Если площадь пожара меньше возможностей первого прибывшего подразделения тушение не требует дополнительных сил и пожар ликвидируется в течение расчетного времени.

При развившемся пожаре, когда первое прибывшее на пожар ППО не может обеспечить требуемой интенсивности подачи ОТВ, тушение осуществляется на решающем направлении, введение сил и средств ПО на котором позволяет при меньшем количестве сил предотвратить дальнейшее распространение пожара. Для этого по мере прибытия ППО создаются условия для ограничения распространения фронта пламени (роста площади пожара), то есть пожар локализуется в определенных границах, и создаются условия для его ликвидации. По мере сосредоточения на месте пожара сил и средств ПО, когда фактического расхода воды достаточно для протушивания площади пожара по всему фронту на расчетную глубину тушения, производится собственно процесс тушения и в дальнейшем наступает ликвидация пожара.

Данная модель нормативно закреплена в СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения» [30, 31]. Основной целью данных методик является определение состава сил и средств ПО, необходимых для локализации пожара, что достигается установлением мест дислокации ППО на территории населенных пунктов и объектов с последующим комплектованием личным составом и пожарной техникой.

Научной школой Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны под руководством А.В. Матюшина и А.А. Порошина обосновано, что сосредоточение сил, обеспечивающих требуемый для локализации пожара расход ОТВ, является достаточным условием дальнейшей ликвидации пожара в тех размерах, которые он принял к моменту локализации. Однако данный постулат требует комментария. Ранее (до 1994 года) в основе концептуального подхода к результату тушения пожаров стоял приоритет сохранения государственной и иных видов собственности, то есть пожар должен был быть локализован в тех размерах, которые он принял к моменту прибытия ППО. Система тушения пожаров



была направлена на реализацию данного постулата и предполагала возможность бесперебойной подачи ОТВ с момента прибытия до ликвидации каждым ППО в районе выезда, размеры которого задавались радиусом выезда. Для этого предусматривались соответствующие меры обеспечения тушения пожара объектов, в том числе объектов энергетики (противопожарное водоснабжение, средства защиты участников тушения пожара от ОФП, пожарная техника и численность личного состава пожарной охраны).

С 2009 года в основу концепции обеспечения тушения пожаров был положен временной критерий прибытия ППО к месту пожара, что, безусловно, важно ввиду быстротечности такого явления, как пожар. Этот подход переориентировал пожарную охрану (разработка и совершенствование техники, средств защиты, оптимизация численности личного состава). Данный процесс совпал с общим переходом на рискориентированный подход в сфере безопасности. Одним из наглядных примеров стала замена типа СИЗОД – кислородных регенеративных аппаратов на воздушные резервуарные. Данная замена была экономически и эргономически оправдана, но снизила тактические возможности ППО, сократив более чем в два раза период непрерывной работы первых прибывших подразделений при тушении пожаров внутри зданий и сооружений, который стал меньше времени сосредоточения сил по повышенному номеру вызова. Данное обстоятельство привело к повышенной напряженности в работе и риску для участников тушения пожара, излишнему расходу ресурсов пожарной охраны и росту масштабов пожаров, что в полной мере относится и к пожарам объектов энергетики. Изменения коснулись пожарной техники и оборудования, что привело к созданию их новых моделей, но в меньшей степени затронули противопожарное водоснабжение, вероятно за счет большого срока службы сетей водоснабжения, по сравнению с пожарной техникой, оборудованием и средствами защиты.

Несмотря на концептуальные изменения в организации тушения пожаров, по-прежнему, одним из важнейших аспектов, предотвращающих дальнейшее развитие возникшего пожара, является обеспечение непрерывного тушения пожара с

момента начала подачи ОТВ до локализации, что закладывается на стадии планирования действий по тушению возможных пожаров.

Для этого в современных условиях, наряду с сосредоточением СиС ПО к моменту локализации, следует обеспечивать поддержание ресурсов ПО на месте пожара в процессе всего времени его тушения. Данное условие может быть реализовано через организацию разработки документов предварительного планирования действий по тушению пожаров согласно «Положению о пожарно-спасательных гарнизонах» [95] для критически важных объектов, входящих в соответствующие перечни гарнизонов, что предусматривает расчет необходимых СиС. При этом тушение прогнозируемых пожаров в зданиях и сооружениях ввиду задымления их внутренних объемов следует проводить звеньями ГДЗС, использующими СИЗОД [96]. В соответствии с «Правилами проведения личным составом ФПС ГПС аварийно-спасательных работ при тушении пожаров с использованием СИЗОД в непригодной для дыхания среде» [97] нахождение звена ГДЗС в условиях задымления наряду с соблюдением мер безопасности ограничивается ВЗД применяемых СИЗОД. При необходимости продолжения работы звено осуществляет восстановление готовности (переснаряжение СИЗОД) и производит повторное включение.

Таким образом, модели в основе которых лежит принципе обеспечения требуемого расхода ОТВ не могут в полной мере отразить возможности СиС ПО по непрерывному тушению пожара. Это предполагает необходимость разработки более полной модели, учитывающей влияние тех аспектов обеспечения тушения пожара, которые создают возможность непрерывности данного процесса.

#### **1.4 Концепция, цель и задачи исследования**

Возникновение аварийной ситуации на отдельном объекте энергетики может привести к сбою заметной части энергетического сектора в целом, так как последний представляет собой связанную сложную структуру, которая производит раз-

личные виды энергии и транспортирует ее до потребителя. Причиной таких событий весьма часто является пожар, в случае возникновения которого останавливается процесс производства энергии и возникает необходимость перераспределения мощностей на другие производительные силы. При этом косвенный ущерб, связанный с вынужденным прекращением работы объекта энергетики, может носить и социальный характер, выраженный в нарушении жизнеобеспечения населения.

Пожары на социально-значимых крупных объектах энергетики на территории России происходят ежегодно, чаще, как правило, в холодный период года. Меньшие по масштабам пожары, которые также приводят к перебоям в поставке энергии, происходят ежегодно и исчисляются десятками. В результате анализа пожаров, произошедших на объектах энергетики за 2011–2018 гг., установлено, что доля пожаров на энергопроизводящих объектах, которые приводят к остановке технологического процесса, достигает в отдельные годы 50 %, а на энергораспределительных объектах – 25 %.

Пожар, в соответствии с принятой в России классификацией, может перерасти в ЧС различного масштаба. Анализ обстановки с пожарами за последние 20 лет выявил, что аварии в сфере энергетики и число признанных пострадавшими при них в общем количестве техногенных и природных ЧС составляют большую часть, особенно в ряду крупномасштабных ЧС.

В требованиях нормативно-правовых актов и нормативных документов по пожарной безопасности отсутствует отдельная задача, связанная с необходимостью ликвидации пожара на объекте энергетики в тех масштабах, которые не приведут к остановке в выработке энергии. Задача же сохранения работоспособности объекта или минимизации времени его остановки может считаться специфической, но как показывает практика, весьма значимой для сохранения благополучия населения.

Число пожаров объектов энергетики снижается на фоне роста ущерба от них. Наибольший материальный ущерб приносит пожар, происходящий в энергоблоке электростанций и в кабельных тоннелях, галереях. Статистические данные подтверждают, что общий материальный ущерб объектов энергетики в значительной

мере формируется от последствий крупных пожаров. Весьма вероятна ситуация, когда один пожар может нанести ущерб, сопоставимый с ущербом от всех пожаров на объектах энергетики за определенный период.

Особенностью объектов энергетики является то, что они взаимосвязаны со всеми отраслями деятельности человека, и имеются как в крупных городах и промышленных центрах, так и отдаленных поселениях, а также в сельскохозяйственном производстве. Объекты энергетики рассредоточены по всей территории России и присутствуют в каждом пожарно-спасательном гарнизоне. Закономерно, что на территории, охраняемой более крупными пожарно-спасательными силами, находится большее количество объектов энергетики, в том числе крупных. Но и из этого общего правила имеются исключения – удаленные от крупных населенных пунктов значимые для энергетики России объекты – АЭС, ГЭС. Характер обеспечения тушения пожаров на них отличается от объектов энергетики, расположенных в крупных населенных пунктах, где в течение короткого промежутка времени могут быть сосредоточены значительные силы и средства пожарной охраны.

Своевременное тушение пожара обеспечивается возможно быстрым началом тушения пожара. В случае тушения пожарными подразделениями – их прибытием и, в дальнейшем, непрерывной подачей ОТВ при наращивании сил и средств пожарной охраны до требуемого уровня.

Обеспечение локализации тушения пожаров объектов энергетики подразумевает взаимосвязанное выполнение условий обеспечения подачи ОТВ, доступа к очагу пожара на фоне защиты участников тушения пожара от воздействия ОФП и поражения электрическим током. Как показало настоящее исследование, на современном этапе уровень обеспечения двух последних условий достигнут, за исключением недостаточного времени защитного действия СИЗОД пожарных по сравнению со временем тушения пожаров объектов энергетики, и задержки времени начала тушения, связанного с получением допуска на тушение электроустановок.

Проведенный анализ подачи ОТВ при пожарах объектов энергетики в части удельного расхода и степени превышения нормативной интенсивности подачи ОТВ показал достаточную обеспеченность объектов энергетики ОТВ и средствами

подачи. В то же время характер превышения этих показателей говорит о сложности подачи ОТВ непосредственно в зону горения на фоне достаточности ОТВ. Излишнее расходование ОТВ обусловлено в значительной степени скрытостью зон горения от пожарных за дымом, что подтверждается ростом применения пожарными средств защиты, обеспечивающих работу в условиях непригодной для дыхания среды на фоне снижения числа пожаров объектов энергетики. Это связано с возрастающей сложностью тушения на данных объектах, а именно с повышенным риском поражения электрическим током, большой горючей нагрузкой, сложной планировкой помещений и др. При этом в условиях задымления время на развертывание сил растет, как следствие, увеличивается и время начала подачи ОТВ. Проведенный анализ пожаров позволил установить, что из аспектов, составляющих локализацию пожаров в зданиях объектов энергетики, наибольшую проблему представляет доступ пожарных к зоне горения.

Анализ состояния решаемой проблемы позволил сформулировать общую концепцию исследования в виде *научно обоснованного решения* социально значимой государственной проблемы – минимизации последствий пожаров объектов энергетики, которые могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций социально-экономического характера, связанных с прекращением подачи энергии населенным пунктам, промышленным объектам и объектам инфраструктуры. Для реализации концепции поставлена цель работы и определены основные задачи исследования.

**Цель работы** – разработка теории локализации пожара, направленной на сохранение работоспособности объекта энергетики, и развитие теоретических основ жизнеобеспечения участников тушения пожара в условиях воздействия опасных факторов.

**Основные задачи исследования:**

– выполнить анализ последствий пожаров объектов энергетики с учетом мер обеспечения локализации пожаров и реагирования подразделений пожарной охраны с выявлением факторов, снижающих работоспособность объекта энергетики;

– произвести на основе математического моделирования сравнительный анализ тушения пожаров объектов энергетики, моделирование обеспечения непрерывного тушения пожара объекта энергетики в условиях воздействия опасных факторов на участников тушения пожара и разработать теоретическую основу локализации пожаров объектов энергетики;

– произвести моделирование способов и совершенствование средств защиты участников тушения пожаров объектов энергетики от опасных факторов пожара и обосновать комплекс технических средств обеспечения работ в непригодной для дыхания среде при тушении пожаров объектов энергетики;

– произвести прогнозное моделирование и разработать теоретические основы жизнеобеспечения персонала в условиях воздействия опасных факторов при возникновении пожара на объекте энергетики, ускорения начала действий подразделений пожарной охраны, и усовершенствовать методы обеспечения готовности персонала объектов энергетики и пожарных к действиям по локализации пожара;

– разработать теоретическую основу повышения тактико-технических возможностей пожарных по обеспечению тушения пожаров объектов энергетики, для чего разработать способы и средства улучшения видимости в дыму и исследовать возможность локализации пожаров объектов энергетики объемным способом от мобильных средств пожаротушения;

– обосновать метод локализации пожара объекта энергетики, произвести оценку достаточности сил и средств пожарно-спасательных гарнизонов для локализации пожаров объектов энергетики и на их основе разработать концепцию оптимизации противопожарной защиты объектов энергетики.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

### 2.1 Сравнительное моделирование сложности тушения пожаров в зданиях объектов энергетики

С целью оценки характера тушения пожаров в зданиях объектов энергетики и сравнения с процессом тушения пожаров других видов объектов разработан показатель сложности тушения пожара (СТП), который включает набор исходных данных, позволяющих сопоставить масштаб пожара, возможности подачи ОТВ, временные периоды тушения, и факторы, усложняющие тушение пожара. Показатель СТП позволяет определять уровень сложности тушения пожаров различных объектов, а также сравнивать различные выборки пожаров независимо от их размера. Исходными данными для расчета СТП являются федеральный банк статистических данных о пожарах в Российской Федерации, формируемый в соответствии с приказом МЧС России от 26 декабря 2014 г. №727 «О совершенствовании деятельности по формированию электронных баз данных учета пожаров (загораний) и их последствий» [55].

Основой формирования показателя СТП является сочетание учитываемых факторов пожаров и данных о них, в совокупности влияющих на сосредоточение сил и средств пожарной охраны, напряженность и риск действий участников тушения пожаров, время и масштаб локализации и ликвидации пожара. Базовым элементом показателя СТП является масштаб пожара, сочетающий его площадь и время тушения (от введения первого ствола на тушение до прекращения открытого горения). Воздействие на горение определяется числом привлеченных к тушению первичных тактических единиц (мобильных средств пожаротушения с расчетом, способным проводить спасательные работы и осуществлять тушение пожара в непригодной для дыхания среде) относительно поданных на тушение и защиту приборов подачи ОТВ. Учитывается сложность обстановки на пожаре, связанная с

необходимостью выполнения спасательных и эвакуационных работ, наличием пострадавших, опасностью объекта пожара для участников тушения и доступностью зоны горения для подачи ОТВ, а также превышение фактической интенсивности подачи над нормативной для данного вида объектов или помещений пожара.

Показатель СТП имеет физический смысл масштаба пожара во времени (произведение площади пожара на время тушения) ( $\text{м}^2 \cdot \text{мин}$ ), скорректированный коэффициентами:

$$\text{СТП} = \frac{K_{\text{сл}} \cdot N_{\text{ТЕ}} \cdot S_{\text{п}} \cdot t_{\text{ОГ}} \cdot \Delta I}{N_{\text{СТВ}}}, \quad (2.1)$$

где  $K_{\text{сл}}$  – коэффициент сложности обстановки;

$N_{\text{ТЕ}}$  – общее количество первичных тактических единиц, шт.;

$S_{\text{п}}$  – площадь пожара,  $\text{м}^2$ ;

$t_{\text{ОГ}}$  – время открытого горения, мин;

$\Delta I$  – превышение фактической интенсивности над нормативной;

$N_{\text{СТВ}}$  – общее количество приборов подачи ОТВ (стволов), шт.

Коэффициент сложности обстановки состоит из коэффициентов степени огнестойкости ( $K_{\text{СО}}$ ), этажности ( $K_{\text{эт}}$ ) и коэффициента последствий пожара ( $K_{\text{посл}}$ ):

$$K_{\text{сл}} = K_{\text{СО}} \cdot K_{\text{эт}} \cdot K_{\text{посл}}. \quad (2.2)$$

Коэффициенты этажности и степени огнестойкости увеличиваются с повышением опасности объекта пожара для участников тушения пожара, что связано с меньшей доступностью зоны горения для подачи ОТВ. Коэффициент последствий пожара учитывает необходимость задействования сил и средств на проведение спасательных и эвакуационных работ, а также поиска травмированных (погибших), и замедление работ по тушению, связанных с их обнаружением.

Формирование баз данных, расчетных данных и порядок определения показателя СТП представлено на рисунке 2.1



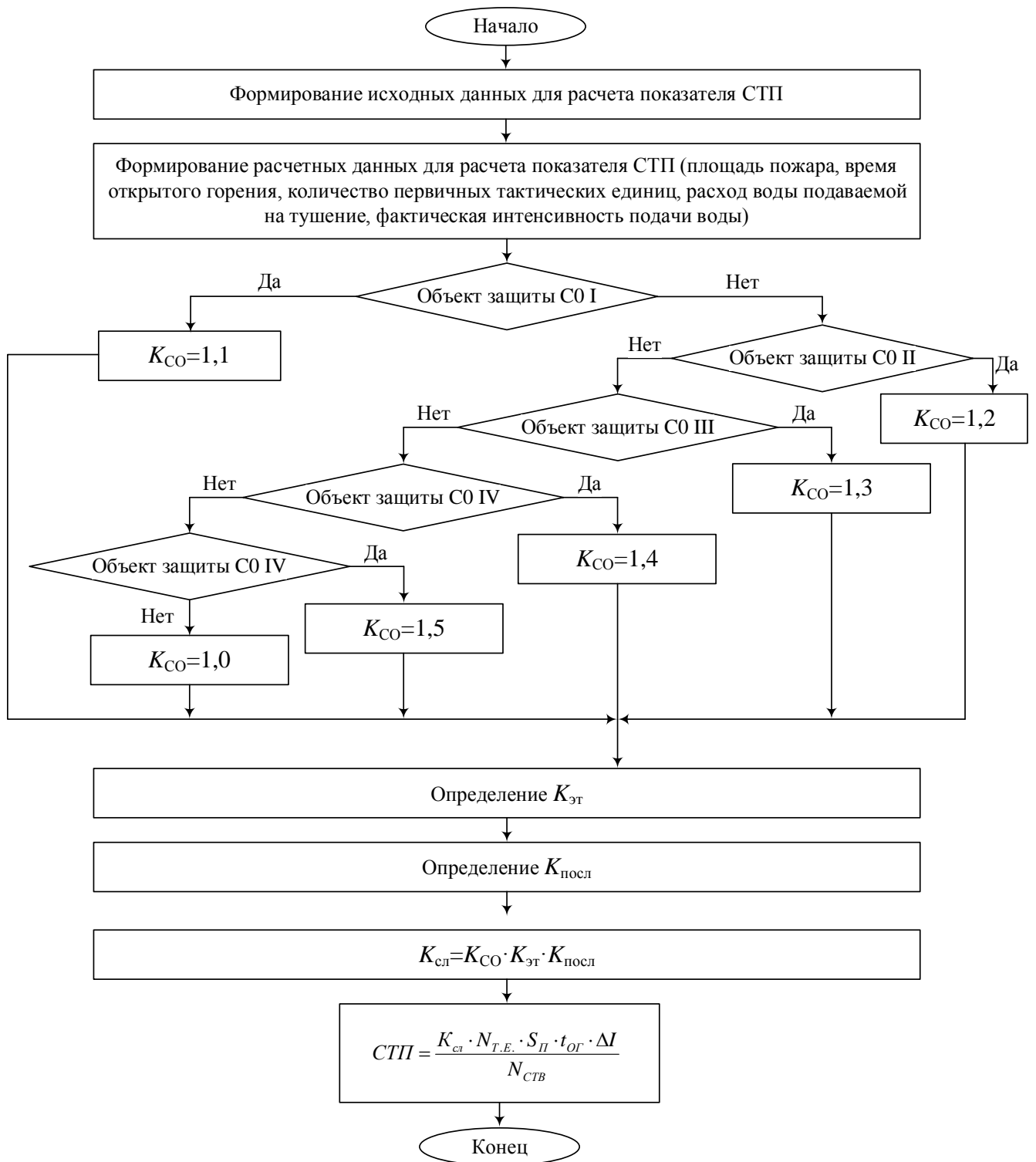


Рисунок 2.1 – Формирование баз данных, расчетных данных и порядок определения показателя СТП

Коэффициент этажности  $K_{ЭТ}$  принимает значение в зависимости от места возникновения пожара (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Значение коэффициент этажности  $K_{ЭТ}$  в зависимости от места пожара

Этаж	1	2	...	99	Более 99	Цокольный	Подвальный	Мансардный	Чердачный	Технический	1-й подземный	2-й подземный	3-й подземный	4-й подземный и более
Значение $K_{ЭТ}$	1,01	1,02	...	1,99	2,0	1,1	1,5	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9

Коэффициент последствий пожара  $K_{Посл}$  определяется согласно таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Коэффициент последствий пожара  $K_{Посл}$  (при наличии нескольких – перемножаются, при отсутствии равен 1,0):

Число случаев выполнения работ или событий	Человек		Скота	Техники и материальных ценностей		Человек погребло		Человек травмировано	
	Спасено	Эвакуировано	Спасено	Спасено техники	Спасено: мат. ценностей	всего	работников ПО	всего	работников ПО
1	1,1	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,1	1,01	1,01
2	1,2	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,2	1,02	1,02
3	1,3	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,3	1,03	1,03
4	1,4	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,4	1,04	1,04
5	1,5	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,5	1,05	1,05
...									
10	2,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	2,0	1,1	1,1
11	2,1	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	2,1	1,11	1,11
...									
20	3,0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	3,0	1,2	1,2
21	3,1	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	3,1	1,21	1,21
...									
30	4,0	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	4,0	1,3	1,3
3,1	4,1	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	4,1	1,31	1,31
...									
40	5,0	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	5,0	1,4	1,4
...									
100	11,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	11,0	2,0	2,0
101	11,1	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	11,1	2,01	2,01
...									
200	20,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	20,0	3,0	3,0
201	20,1	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	20,1	3,01	3,01

Расчет удельного расхода производится перемножением значений общего расхода ОТВ, подаваемых на тушение пожара, и значения времени открытого горения с последующим делением на значение площади пожара, л/м<sup>2</sup>:

$$Q_{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{ТП}} \cdot T_{\text{ОГ}}}{S_{\text{п}}} . \quad (2.3)$$

Расчет площадной скорости тушения пожара производится делением значения площади пожара на время открытого горения. Расчет площадной скорости тушения пожара одним стволом производится делением значения площади пожара на время открытого горения и на общее количество приборов подачи ОТВ (стволов):

$$V_{\text{ств}} = \frac{S_{\text{п}}}{T_{\text{ОГ}}} , \quad (2.4)$$

$$V_{\text{ств1}} = \frac{S_{\text{п}}}{T_{\text{ОГ}} \cdot N_{\text{ств}}} . \quad (2.5)$$

Расчет превышения нормативной интенсивности производится делением значений фактической интенсивности подачи, л/мин·м<sup>2</sup>, на значение нормативной интенсивности, л/мин·м<sup>2</sup>:

$$\Delta I = \frac{I_{\text{ф}}}{I_{\text{н}}} . \quad (2.6)$$

Расчет показателя сложности тушения (ф-ла (2.1)) производится перемножением значений коэффициента сложности обстановки, общего количества первичных тактических единиц, площади пожара, превышения нормативной интенсивности и времени открытого горения с последующим делением на значение общего количества приборов подачи ОТВ (стволов).

Значения рассчитанных показателей сложности тушения, удельного расхода и превышения нормативной интенсивности усредняются по рассматриваемым выборкам банка данных: субъект Российской Федерации; вид населенного пункта; тип предприятия, организации, учреждения; объект пожара (загорания); средства индивидуальной защиты органов дыхания.

Показатель СТП может рассчитываться для любых выборок из банка данных о пожарах. В качестве примера на рисунке 2.2 представлены результаты расчета показателя СТП для пожаров в России, произошедших за период с 2011 по 2018 гг. в зависимости от класса функциональной пожарной опасности зданий, а

также для зданий класса Ф5, к которым относятся объекты энергетики, и по объектам энергетики с группировкой по энергопроизводящим и энерготранспортирующим объектам.

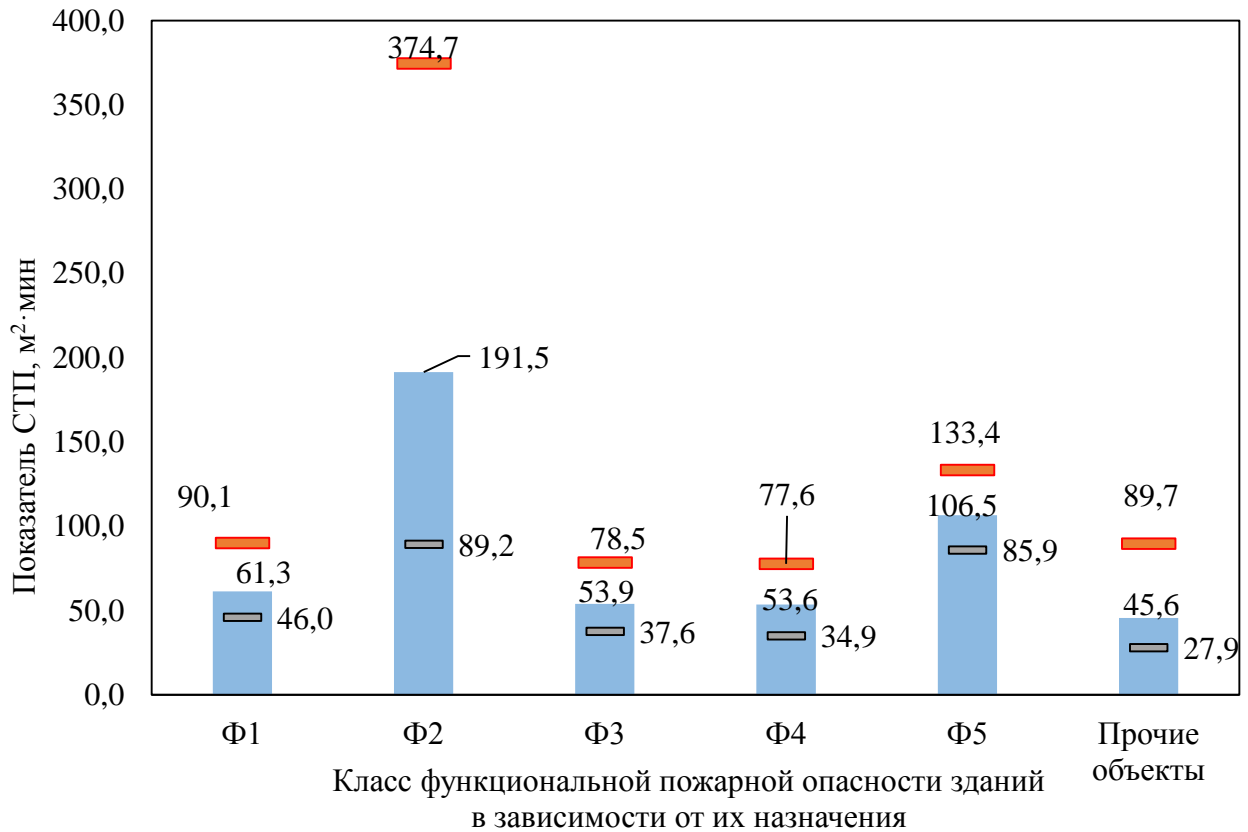


Рисунок 2.2 – Показатель сложности тушения пожаров за 2011–2018 гг.:

- – показатель сложности тушения пожара;
- – показатель сложности тушения пожара при использовании СИЗОД;
- – показатель сложности тушения пожара без использования СИЗОД

Дальнейший анализ сложности тушения пожаров будет представлен, в основном, для производственных предприятий, к которым относятся объекты энергетики (таблица 2.3).

Среди зданий производственного или складского назначения пожары объектов энергетики не являются самыми сложными, а занимают среднее положение (рисунок 2.3).

Таблица 2.3 – Классификация предприятий в соответствии с требованиями приказа МЧС России от 26 декабря 2014 № 727 «О совершенствовании деятельности по формированию электронных баз данных учета пожаров (загораний) и их последствий» [55]

Номер типа предприятия	Вид предприятия
11	Предприятие электроэнергетики
12	Предприятие черной металлургии
13	Предприятие химической и нефтехимической промышленности
14	Предприятие машиностроения и металлообработки
15	Предприятие лесной, деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной промышленности
16	Предприятие промышленности строительных материалов
17	Предприятие легкой промышленности
18	Предприятие пищевой промышленности
19	Предприятие сельскохозяйственного назначения
20	Предприятие топливной промышленности
21	Предприятие цветной металлургии
22	Предприятие транспорта
23	Предприятие (организация) строительства
24	Предприятие, организация жилищно-коммунального хозяйства
25	Предприятие судостроения и судоремонта
26	Предприятие по производству лекарственных препаратов
27	Предприятие угольной промышленности
30	Прочие предприятия производственного назначения
31	Складское предприятие, база, хранилище
99	Отсутствует, не установлен

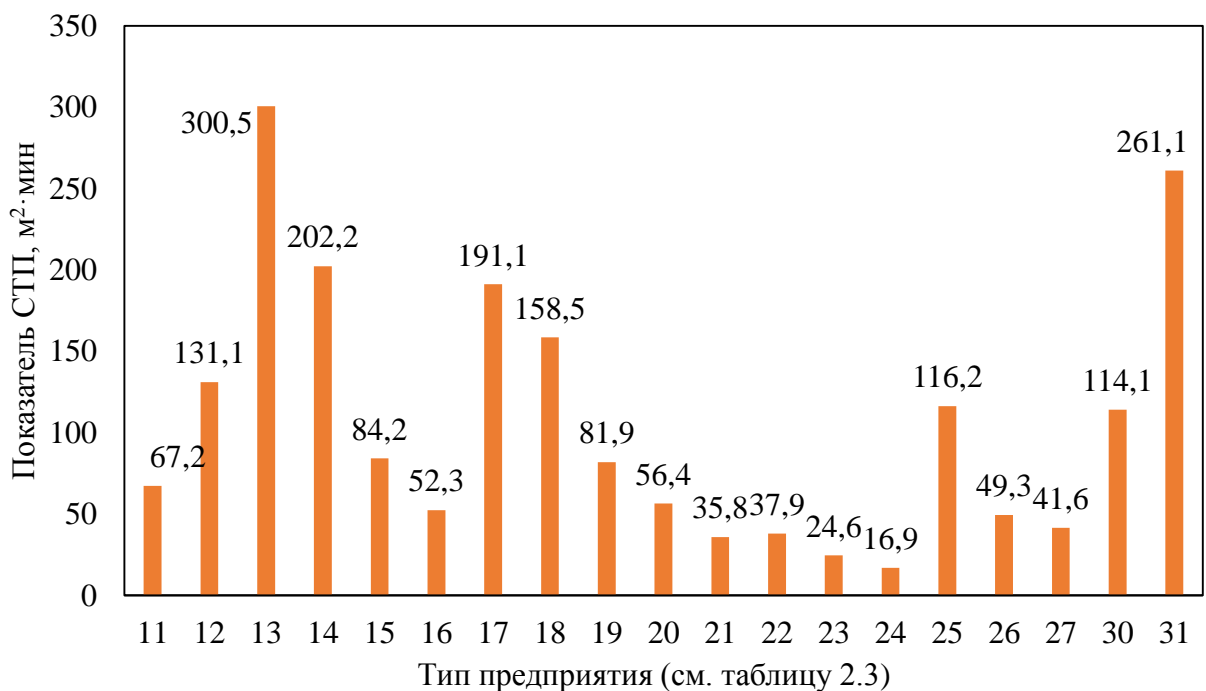


Рисунок 2.3 – Показатель СТП различных типов производственных и складских предприятий за 2013–2018 гг.

Следует отметить, что показатель СТП объектов энергетики внутри зданий с использованием СИЗОД является одним из самых высоких для зданий производственного и складского назначения (рисунок 2.4), а показатель СТП объектов энергетики без применения СИЗОД – одним из самых низких в этой группе объектов (рисунок 2.5).

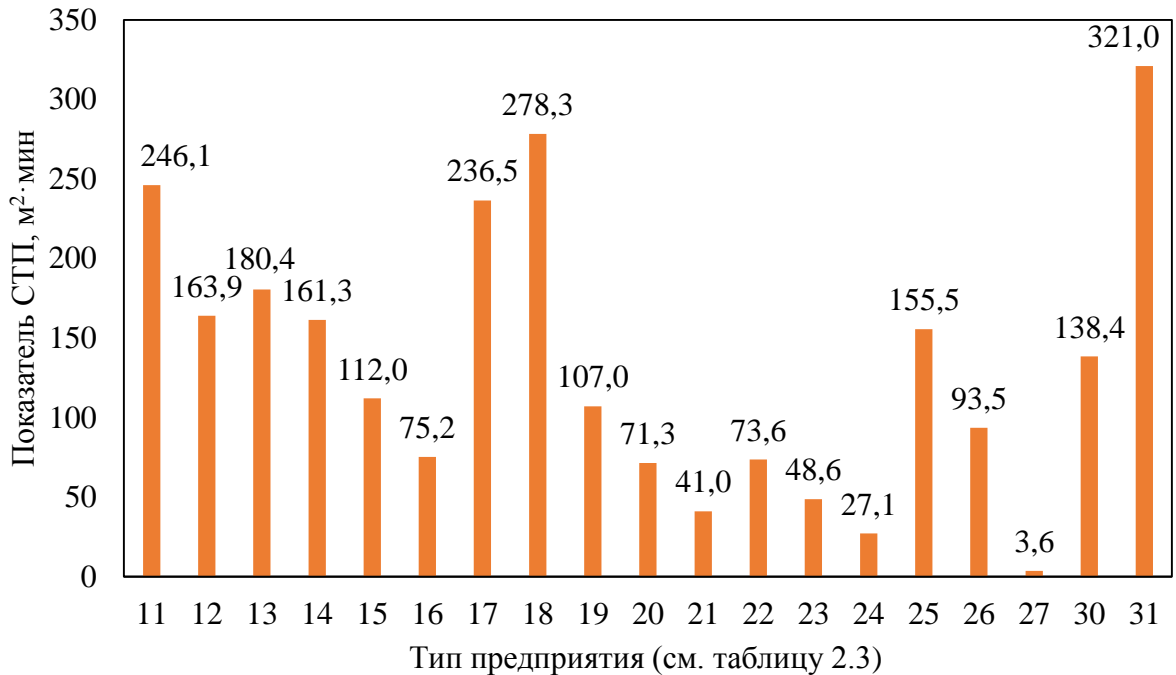


Рисунок 2.4 – Показатель СТП различных типов производственных и складских предприятий с использованием СИЗОД за 2013–2018 гг.

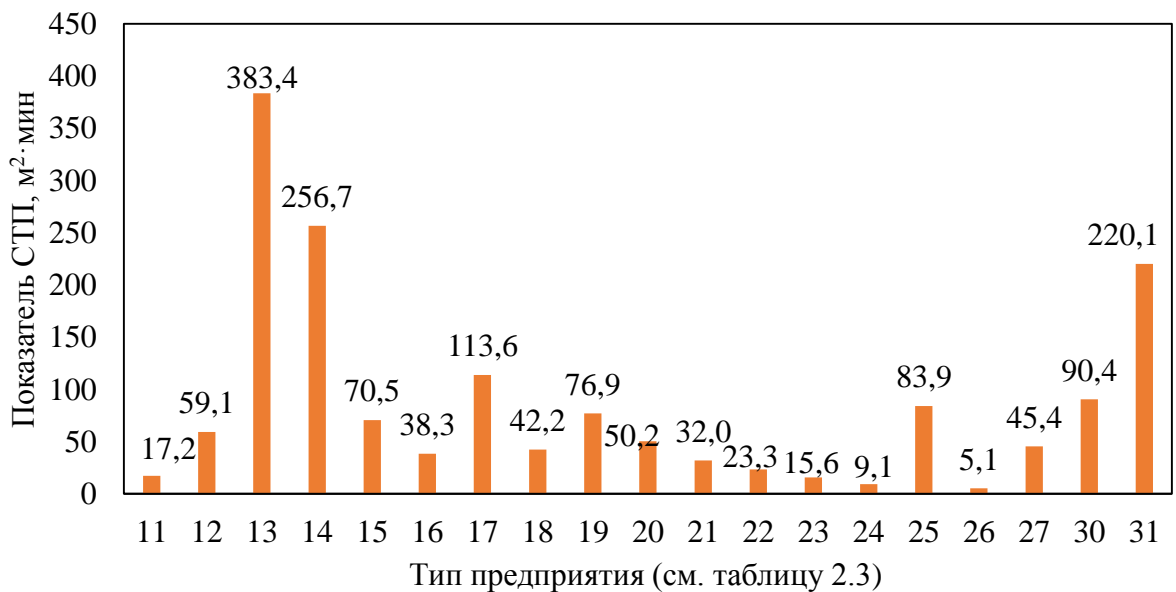


Рисунок 2.5 – Показатель СТП различных типов производственных и складских предприятий без использования СИЗОД за 2013–2018 гг.

Соотношение сложности тушения объектов энергетики в СИЗОД к сложности тушения без них характеризует пожары объектов энергетики как наиболее сложные с точки зрения тушения внутри зданий, что связано с их высокой пожарной опасностью и большими объемами задымляемых помещений (рисунки 2.6–2.12).

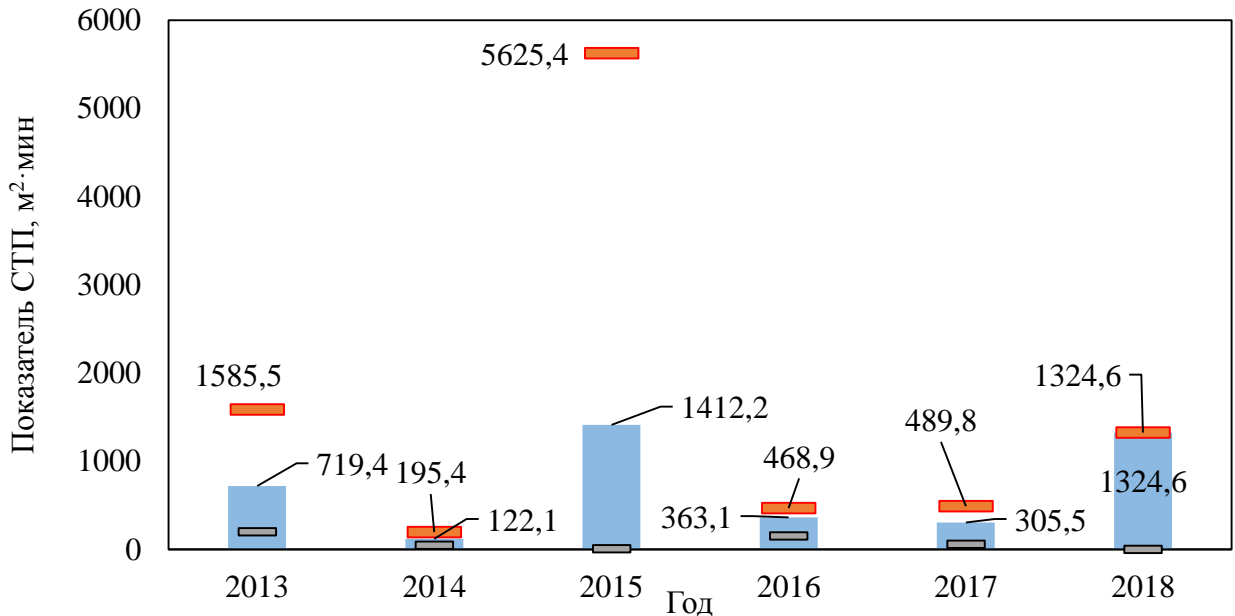


Рисунок 2.6 – Показатель СТП зданий энергоблока тепловой или гидравлической электростанции за 2013–2018 гг.:

■ – показатель СТП; ■ – СТП при использовании СИЗОД;  
■ – СТП без использования СИЗОД

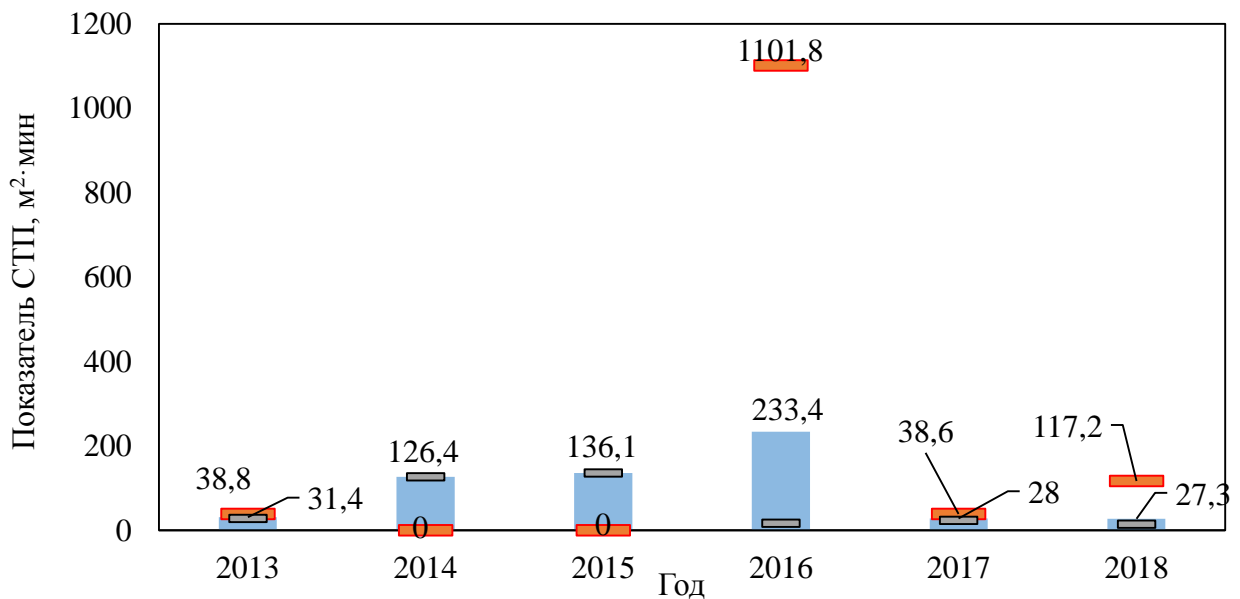


Рисунок 2.7 – Показатель СТП зданий дизельной электростанции за 2013–2018 гг.:

■ – показатель СТП; ■ – СТП при использовании СИЗОД;  
■ – СТП без использования СИЗОД

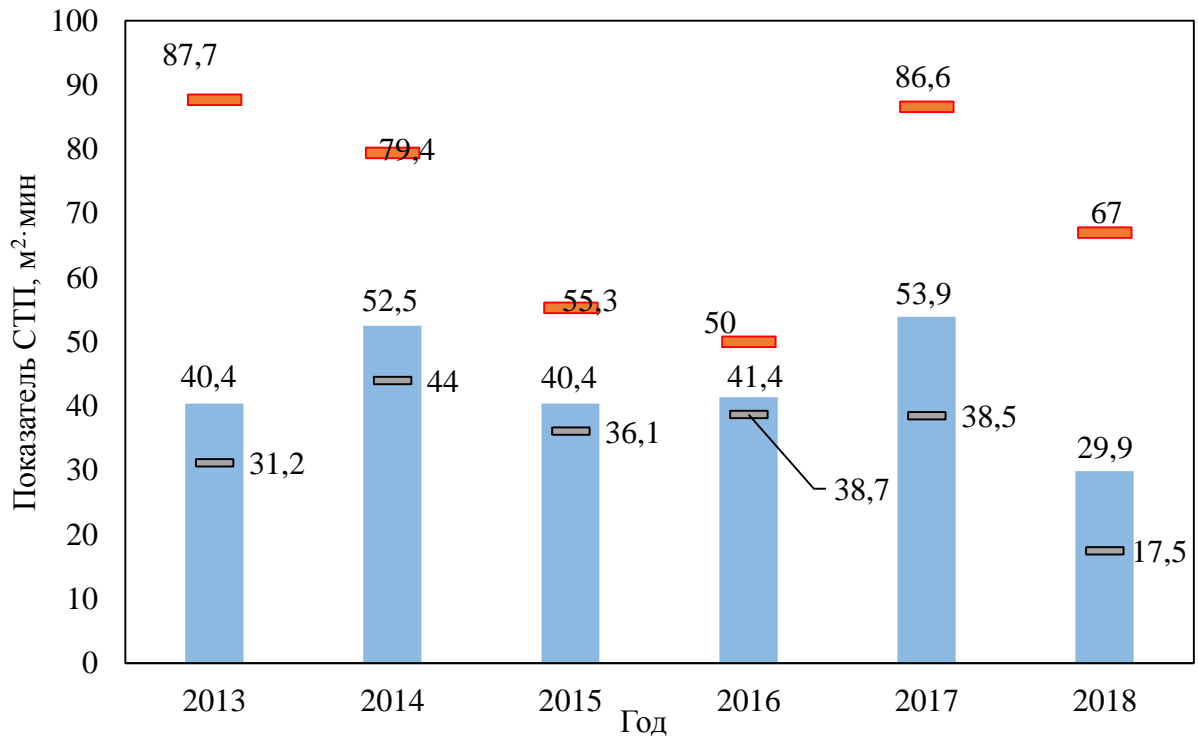


Рисунок 2.8 – Показатель СТП зданий котельной за 2013–2018 гг.:

- – показатель СТП; ■ – СТП при использовании СИЗОД;
- – СТП без использования СИЗОД

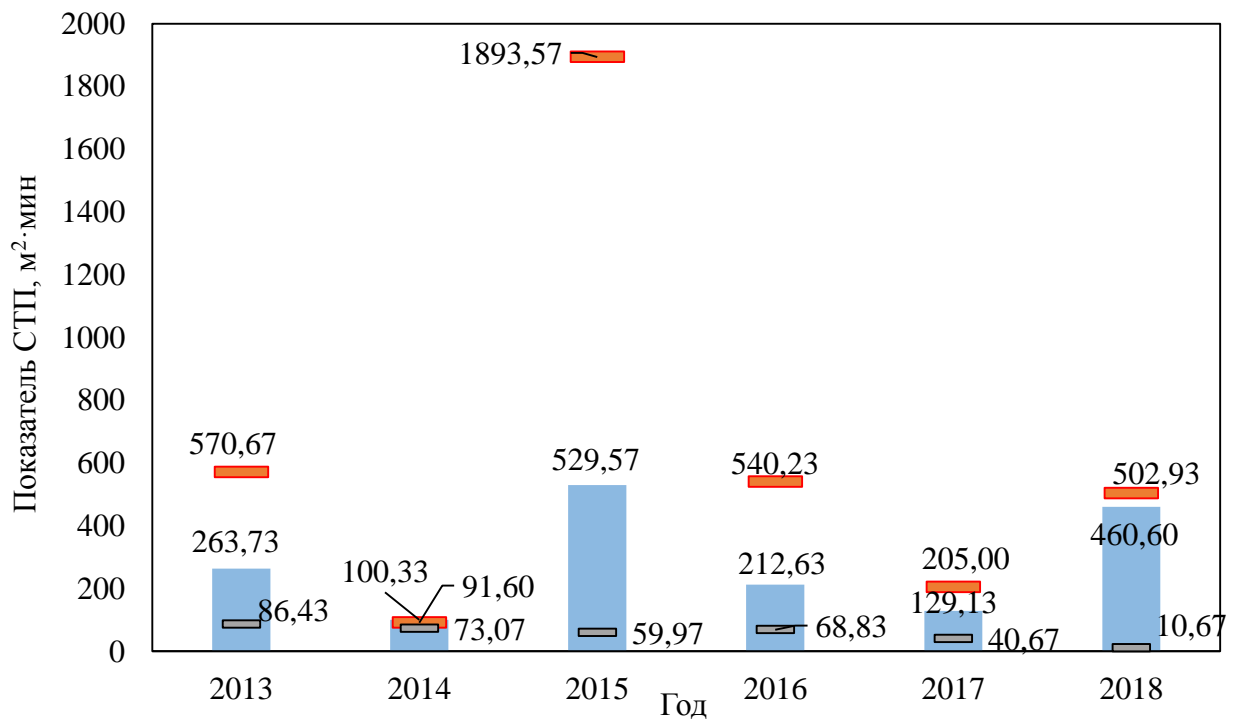


Рисунок 2.9 – Показатель СТП зданий энергопроизводящих объектов за 2013–2018 гг.:

- – показатель СТП; ■ – СТП при использовании СИЗОД;
- – СТП без использования СИЗОД



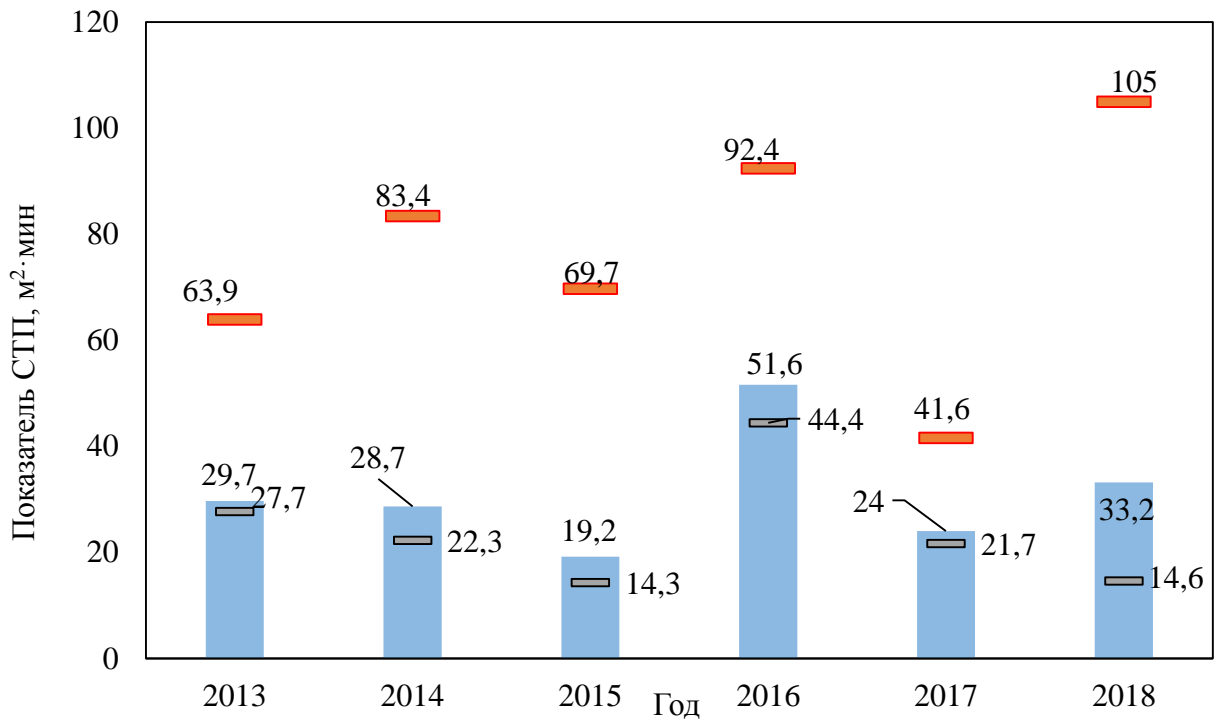


Рисунок 2.10 – Показатель СТП электротрансформаторных подстанций, трансформаторов, электродизельных установок за 2013–2018 гг.:

■ – показатель СТП; ■ – СТП при использовании СИЗОД;  
 ■ – СТП без использования СИЗОД

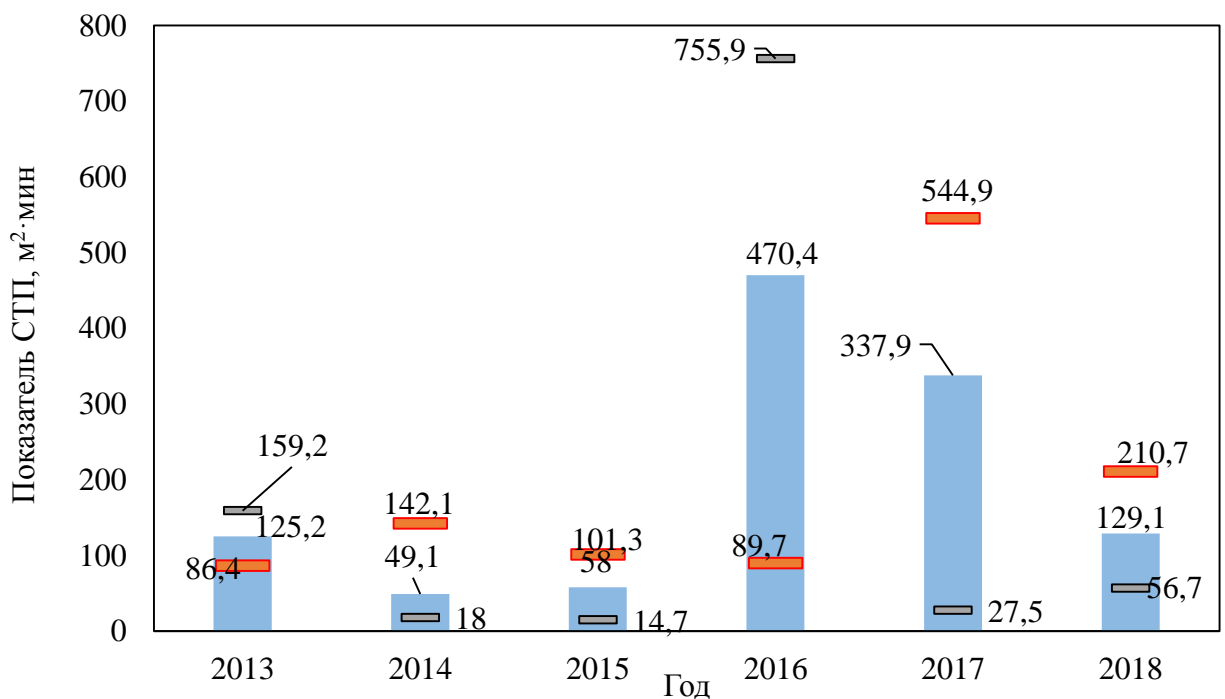


Рисунок 2.11 – Показатель СТП кабельных тоннелей, галерей за 2013–2018 гг.

■ – показатель СТП; ■ – иСТП при использовании СИЗОД;  
 ■ – СТП без использования СИЗОД

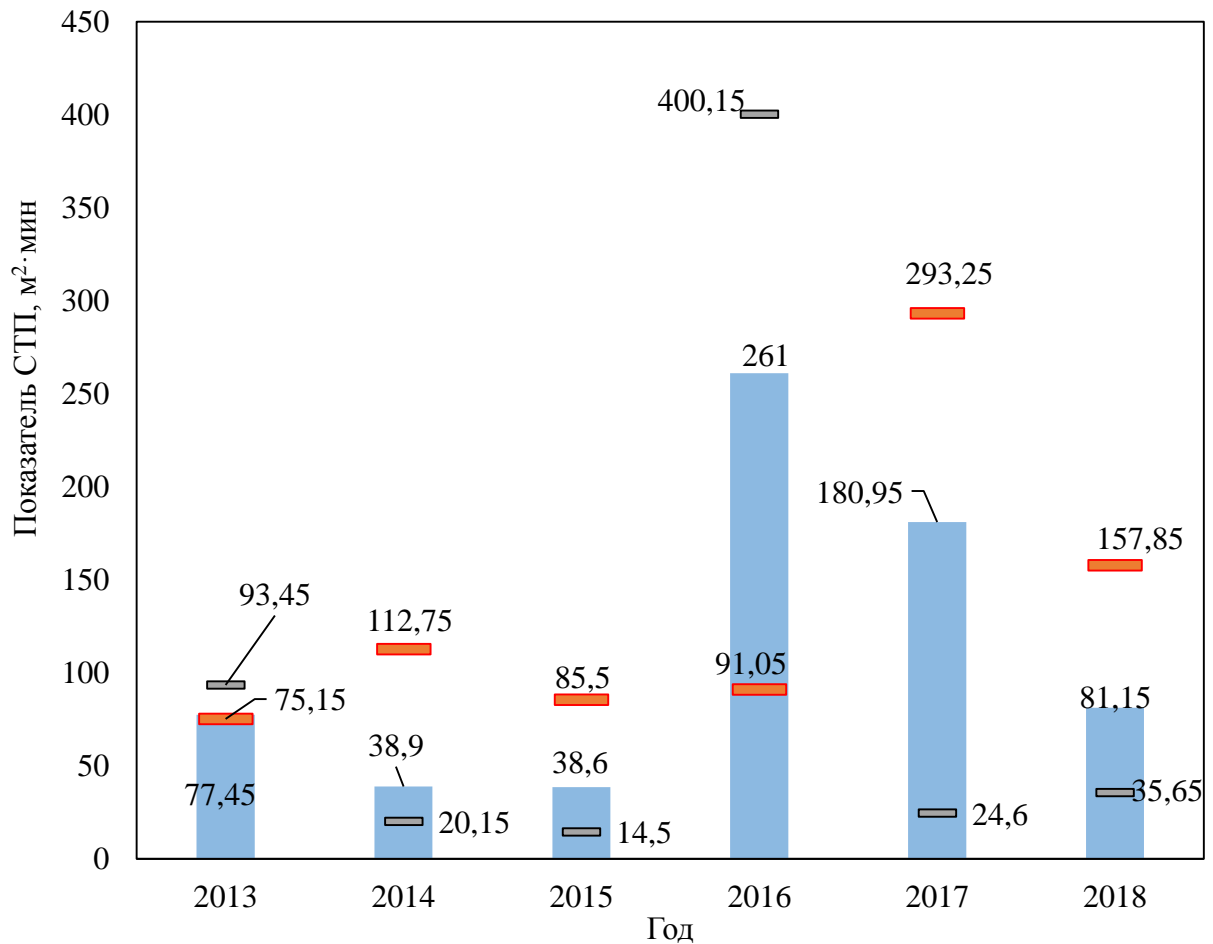


Рисунок 2.12 – Показатель СТП энерготранспортирующих объектов за 2013–2018 гг.:

- – показатель СТП; ■ – СТП при использовании СИЗОД;
- – СТП без использования СИЗОД

На рисунке 2.13 [98] представлена общая диаграмма, полученная в результате математической обработки статистических данных о пожарах за 2013–2018 гг. Распределение показателя СТП для различных типов предприятий подчиняется известным законам распределения. На рисунке 2.13. зависимость 1 описывает общую сложность пожаров по всем типам предприятий, зависимость 2 описывает сложность пожаров, которые потушены при использовании СИЗОД, зависимость 3 – без СИЗОД. Судя по диаграмме, общая сложность 1 близка к распределению Вейбулла ( $We$ ), сложность с СИЗОД 2 – к полунормальному распределению ( $Pn$ ), сложность без СИЗОД 3 – к гамма-распределению ( $Ga$ ).

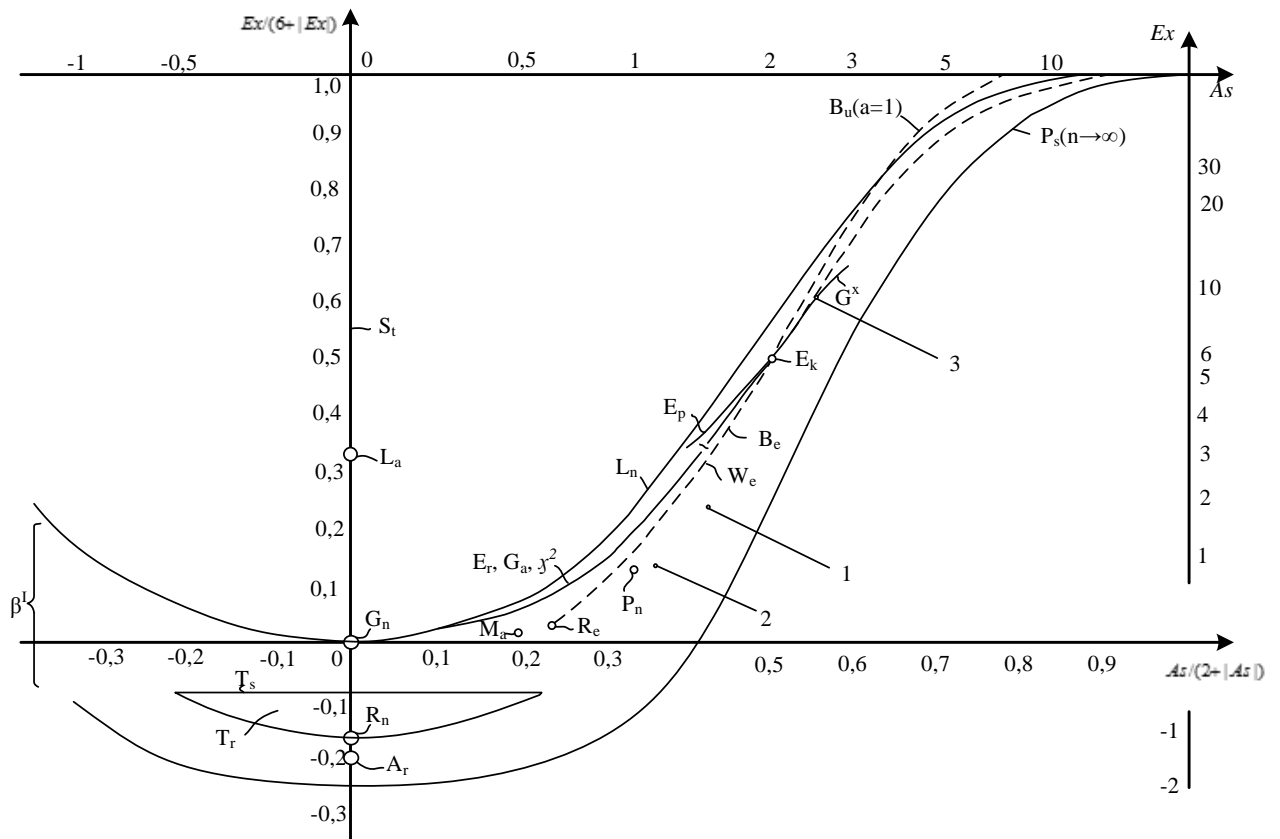


Рисунок 2.13 – Диаграмма распределения показателя СТП для различных типов предприятий:

1 – распределение значения СТП для объектов энергетики подчиняется законам распределения Вейбулла ( $We$ ); 2 – распределение значения СТП для пожаров, которые ликвидировали с применением СИЗОД (подчиняется полунормальному распределению ( $Pn$ )); 3 – распределение значения СТП для пожаров, которые ликвидировали без применения СИЗОД (близко к гамма-распределению ( $Ga$ ))

Математическое ожидание можно определить при помощи гистограмм, представленных на рисунке 2.14 [98].

Результаты расчетов показателя СТП определили, что наибольшую сложность тушения вызывают пожары внутри помещений больших объемов энергопроизводящих предприятий. Эти предприятия в большинстве случаев вырабатывают несколько видов энергии, поэтому пожары вызывают большие предпосылки к возникновению ЧС за их пределами, связанными с перебоями в поставке энергии потребителям.

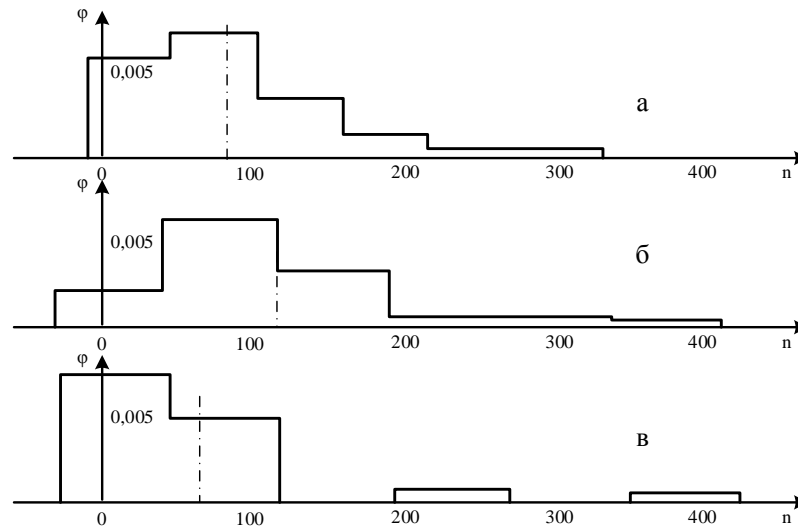


Рисунок 2.14 – Гистограммы математического ожидания показателя СТП для различных типов предприятий: - - - - - – математическое ожидание;  
*а* – математическое ожидание СТП по всем типам объектов энергетики;  
*б* – при пожарах с СИЗОД; *в* – при пожарах без СИЗОД

## 2.2 Моделирование процесса локализации пожара в зданиях объектов энергетики при воздействии опасных факторов на участников тушения пожара

Как было указано в параграфе 1.3, в настоящее время в полной мере не разработаны и не реализованы модели динамики пожара в процессе его тушения с момента начала подачи ОТВ до ликвидации горения. Расчет СиС ПО при разработке документов предварительного планирования предполагает построение совмещенного графика (характерный вид которого представлен на рисунке 2.15), на котором в зависимости от класса пожара, вида пожарной нагрузки и расположения очага пожара расчетно воспроизводится динамика роста площади пожара  $S_{п}(t)$  (здесь  $t$  – время, отсчитываемое от начала пожара) и площади тушения  $S_{т}(t)$  – площади, на которую звенья ГДЗС могут подавать ОТВ. Кроме этого, на совмещенном графике воспроизводится фактический расход на тушение  $Q_{ф}$  в зависимости от моментов времени подачи стволов звеньями ГДЗС и динамика требуемого расхода ОТВ (воды) на тушение:

$$Q_{\text{тр}}(t) = S_{\text{п}}(t)I_{\text{ОТВ}}, \quad (2.7)$$

где  $I_{\text{ОТВ}}$  – интенсивность подачи ОТВ.

При этом соотношение

$$Q_{\text{ф}} \geq Q_{\text{тр}} \quad (2.8)$$

является важнейшим условием локализации пожара.

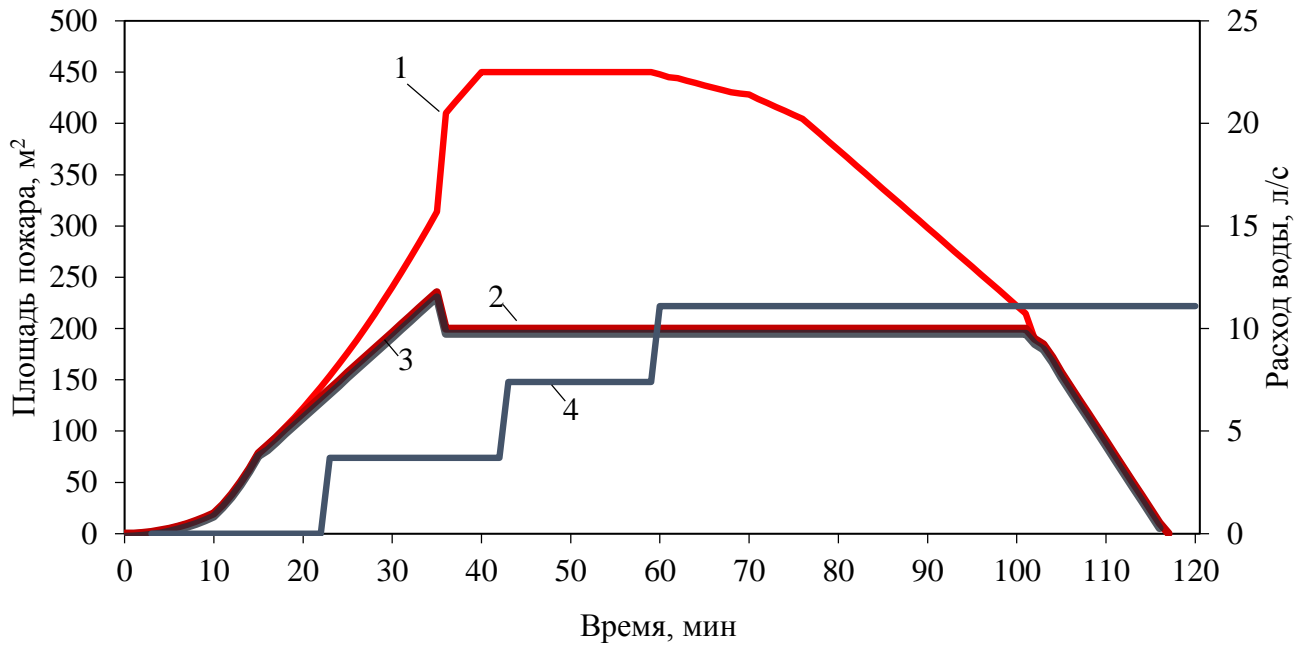


Рисунок 2.15 – Характерный вид совмещенного графика тушения пожара в помещении размерами 10×20 м тремя звеньями ГДЗС:

- 1 – площадь пожара; 2 – площадь тушения пожара; 3 – требуемый расход воды;  
4 – фактический расход воды

Исходя из вида стволов, подаваемых на тушение (для помещений это, как правило, стволы «Б» [93]), и расхода из них ОТВ ( $q_{\text{ств}}$ ), определяется соответствующее число стволов на тушение ( $N_{\text{туш}}$ ) и, следовательно, число звеньев ГДЗС.

С учетом необходимости организации работ по спасению людей и материальных ценностей, осуществляемых в соответствии с требованиями «Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ» [99], и подачи стволов ( $N_{\text{заш}}$ ) на защиту, определяется общее количество пожарных ( $N_{\text{лс}}$ ), вид и количество привлекаемой пожарной техники, а также пожарные части (ПЧ), из которых личный состав и техника должны прибыть на тушение. В результате устанавливается номер (ранг) прогнозируемого

пожара и составляется расписание выездов. Кроме этого, при составлении ПТП и расчете СиС предусматривается оценка достаточности водоснабжения. При использовании сети наружного противопожарного водопровода (НППВ) согласно СП 8.13130.2009 «Источники наружного противопожарного водоснабжения» [100] должно выполняться условие:

$$Q_{\phi} \geq Q_{\text{таб}}, \quad (2.9)$$

где  $Q_{\text{таб}}$  – водоотдача сети НППВ, которая в зависимости от ее типа (тупиковая или кольцевая), диаметров трубопроводов и напора определяется по таблицам [100]. На рисунке 2.16 представлена общая схема расчета СиС, привлекаемых на пожар.

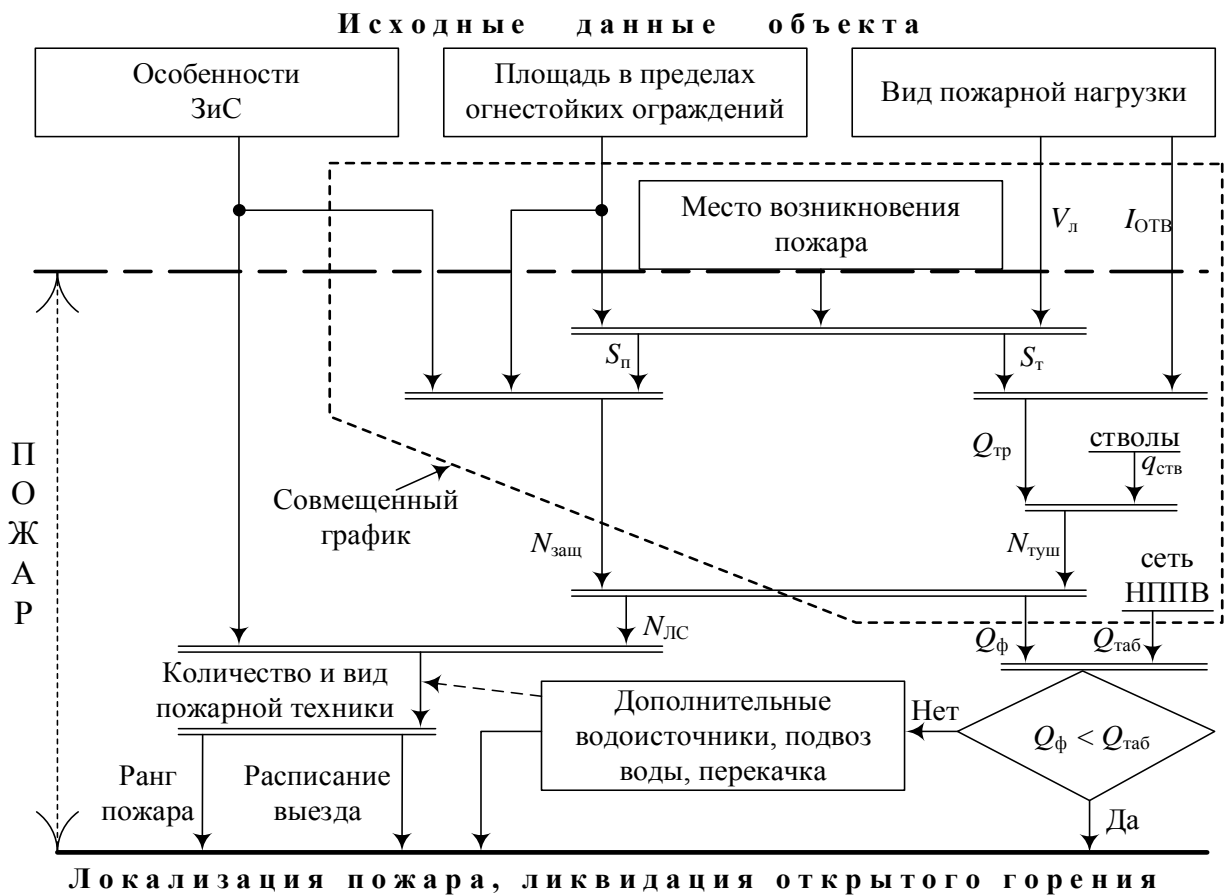


Рисунок 2.16 – Обобщенная схема расчета сил и средств для тушения пожара:

$V_{\text{л}}$  – линейная скорость распространения пожара;  $I_{\text{ОТВ}}$  – требуемая интенсивность подачи ОТВ;  $S_{\text{п}}$ ,  $S_{\text{т}}$  – площади пожара и тушения соответственно;

$N_{\text{туш}}$ ,  $N_{\text{защ}}$  – число стволов на тушение и защиту соответственно;

$Q_{\phi}$ ,  $Q_{\text{таб}}$  – фактический и табличный расход ОТВ;  $q_{\text{ств}}$  – расход ОТВ из ствола;

$N_{\text{ЛС}}$  – количество задействованного личного состава

Как видно из рисунка 2.16, расчет направлен на определение параметров подачи ОТВ, что, несомненно, является определяющим фактором в тушении пожара. Однако сложившийся порядок расчета СиС при составлении ПТП не учитывает такого фактора, как непрерывность подачи ОТВ, которую лимитирует продолжительность работы звеньев ГДЗС ( $t_p$ ) в непригодной для дыхания среде, обусловленную временем защитного действия СИЗОД [96].

Как правило, при построении графика внимание уделяется введению сил (стволов) до момента достижения условия локализации (2.8), а далее считается, что звено ГДЗС обеспечивает на порученном участке тушение пожара, при этом замена в случае необходимости производится из резерва СиС, создаваемого на пожаре.

Действительно, если за  $t_0$  принять ресурс работы СИЗОД в зависимости от его типа [93], то величина  $t_p$  может быть оценена из выражения:

$$t_p = t_0 - t_1 - t_2, \quad (2.10)$$

где  $t_1$ ,  $t_2$  – соответственно время движения звена ГДЗС на позицию подачи ОТВ и время отхода звена с позиции подачи ОТВ в незадымленную зону.

На практике величины  $t_1$  и  $t_2$  могут оказаться весьма заметными по сравнению с временем  $t_p$ , особенно при ликвидации пожаров в многоэтажных зданиях и зданиях больших строительных объемов [93]. Нетрудно предположить, что отсутствие расчета времени работы звеньев ГДЗС при разработке ПТП является причиной привлечения недостаточного количества СиС и, соответственно, причиной повышенной продолжительности тушения пожаров с сопутствующими последствиями.

В этой связи учет ограниченной продолжительности работы ( $t_p$ ) звеньев ГДЗС, осуществляющих тушение, позволит либо скорректировать совмещенный график с учетом периодического снижения величины  $Q_{\phi}$  ввиду отхода звеньев ГДЗС с позиций по мере расходования ресурса СИЗОД, либо предусматривать в дополнение к установленному документами резерву сосредоточение такого числа звеньев ГДЗС, которое обеспечит смену работающих звеньев на позиции подачи ОТВ, чтобы величина  $Q_{\phi}$  не снижалась, обеспечивая выполнение условия (2.8) [101].

Рассмотрим пример условного пожара класса А в помещении объекта энергетики размером  $10 \times 20$  м, с очагом пожара у меньшей стены. Известно, что линейная скорость распространения пламени по пожарной нагрузке 1 м/мин, интенсивность подачи ОТВ  $0,15$  л/(м<sup>2</sup>с) [77]. Помещение располагается на втором этаже двухэтажного здания, а вход в него удален от лестничных клеток на 42 и 35 м.

Такой пожар будет сопровождаться сильным задымлением этажа пожара и вышележащих этажей, поэтому тушение должно осуществляться звеньями ГДЗС со стволами «Б». Ожидается, что время начала подачи стволов соответственно 22, 42 и 60 мин, что обусловлено прибытием пожарных подразделений и выходом звеньев ГДЗС на позиции подачи ОТВ. До 22 минуты пожар развивается свободно. Расчеты показывают, что уже на 20 минуте его площадь достигнет  $100$  м<sup>2</sup>, а затем превысит возможную площадь тушения. После подачи первого и второго стволов звеньями ГДЗС рост площади пожара заметно снизится, а после подачи третьего ствола достигается условие локализации (2.8) – площадь пожара начинает уменьшаться. К 100 минуте площадь пожара сравняется с площадью тушения, а к 115 минуте может быть достигнута ликвидация открытого горения. Соответствующий совмещенный график представлен на рисунке 2.15.

Построенный стандартным способом совмещенный график (рисунок 2.15) справедлив для случаев, когда ресурс работы  $t_p$  СИЗОД звеньев ГДЗС был бы не менее 120 минут или обеспечивалась сменность работы звеньев на позициях подачи ОТВ без перерывов подачи ОТВ. Однако если ресурс работы  $t_p$  ограничен, а смена звеньев ГДЗС на позиции подачи ОТВ не производится, динамика развития и тушения пожара может отличаться в сторону дальнейшего развития пожара, что представлено на рисунке 2.17.

Например, если ресурс работы СИЗОД составляет 40 минут, то на 60 минуте пожара первое звено ГДЗС ввиду израсходования ресурса СИЗОД будет вынуждено покинуть позицию подачи ОТВ, в результате чего условие (2.8) перестает выполняться, и площадь пожара начинает постепенно возрастать. Развитие пожара будет остановлено при восстановлении подачи ОТВ. На 85 минуте пожара второе



звено ГДЗС также будет вынуждено покинуть позицию подачи ОТВ – площадь пожара также будет возрастать. И, наконец, когда и третье звено покинет позицию подачи ОТВ, площадь пожара возрастает уже беспрепятственно с соответствующей номинальной скоростью. Такой процесс развития и тушения пожара, который нельзя считать успешным, представлен на совмещенном графике (рисунок 2.17). Более того, длительное воздействие высокой температуры на строительные конструкции здания может превысить их пределы огнестойкости и повлечь их обрушение.

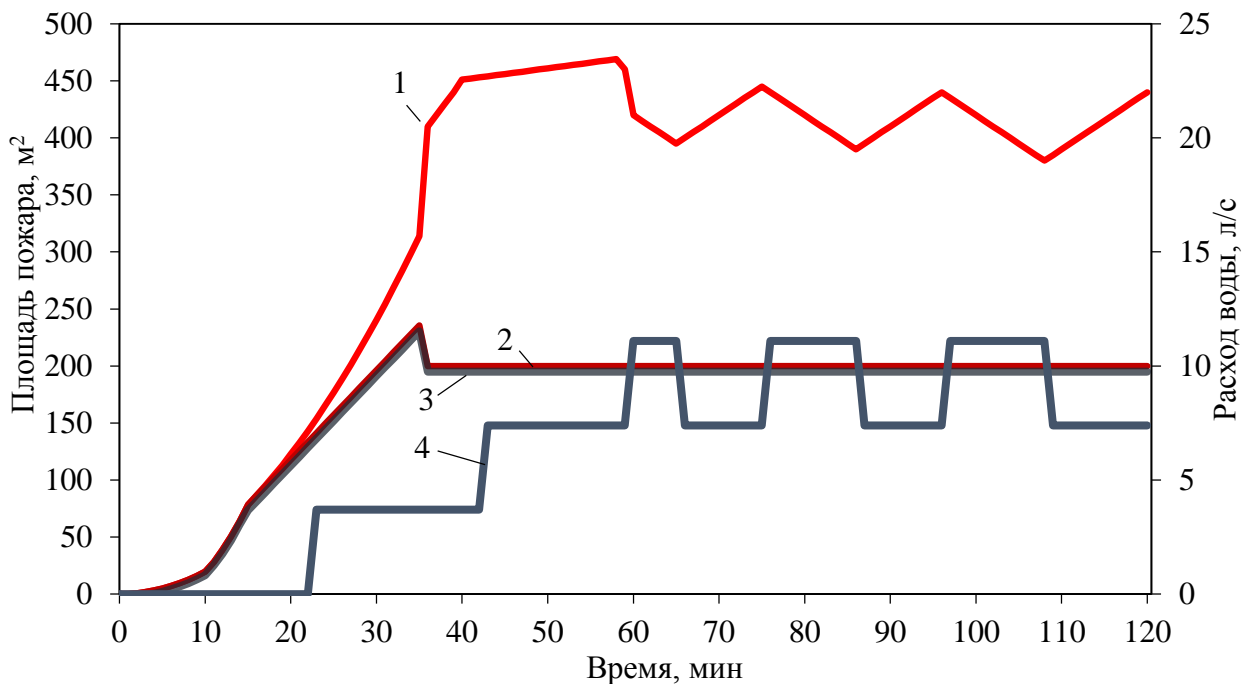


Рисунок 2.17 – Совмещенный график тушения пожара, возникшего у стены помещения

10×20 м, тремя звеньями ГДЗС с учетом ресурса работы в СИЗОД не более 40 мин.:

1 – площадь пожара; 2 – площадь тушения пожара; 3 – требуемый расход воды;

4 – фактический расход воды

Разумеется, данный пример является несколько условным и основывающимся на общепринятых допущениях [93], однако он наглядно показывает риск некорректной оценки динамики развития и тушения пожара в непригодной для дыхания среде звеньями ГДЗС без учета ресурса работы их СИЗОД. Конечно, в модифицированном совмещенном графике можно учесть и прибытие новых звеньев ГДЗС, которые даже с учетом вынужденных перерывов в подаче ОТВ обеспечат

повторение наращивания сил для локализации пожара и его последующей ликвидации. Тем не менее, любое прекращение подачи ОТВ будет приводить к увеличению времени тушения пожара и его дальнейшему развитию. Чем больше будут перерывы в подаче ОТВ на каждой позиции, тем сильнее развитие пожара.

В связи с этим следует уточнить расчет числа привлекаемых к тушению пожара звеньев ГДЗС для последующего его наложения на расчет сосредоточения СиС для обеспечения тушения пожара. Процесс работы звена ГДЗС на пожаре можно условно разделить на четыре фазы, представленных на рисунке 2.18.



Рисунок 2.18 – Этапы действий звена ГДЗС при работе в условиях задымления

Первая фаза – собственно работа в задымленном помещении с защитой органов дыхания и зрения посредством дыхательного аппарата (ДА) – тушение пожара ОТВ, спасение людей и имущества.

Вторая фаза – выход из зоны задымления по мере израсходования запаса воздуха в дыхательном аппарате сжатого воздуха (ДАСВ) или кислорода при использовании дыхательного аппарата на сжатом кислороде (ДАСК).

Третья фаза – выключение из ДА, восстановление готовности (смена баллонов (патронов) или заполнение воздухом при помощи компрессора), включение в ДА.

Четвертая фаза – возвращение на позицию подачи ОТВ для продолжения тушения и смены работающего звена ГДЗС.

Длительность первой фазы ( $t_1$ ) определяется минимальным ресурсом ДА одного из газодымозащитников в звене с учетом возможности выхода из зоны задымления. Длительность второй фазы ( $t_2$ ) обуславливается временем выхода из зоны задымления и прибытием к месту восстановления готовности (контрольно-пропускному пункту, пожарному автомобилю, автомобилю-базе ГДЗС, пожарной компрессорной станции). Длительность третьей фазы ( $t_3$ ) – время замены баллонов или закачки в них воздуха компрессором. Длительность четвертой фазы ( $t_4$ ) – время возвращения звена ГДЗС на позицию подачи ОТВ.

Следует обратить внимание, что длительности  $t_2$  и  $t_4$  не всегда одинаковы, поскольку в одном случае приходится, например, подниматься на этаж пожара, а в другом случае – спускаться вниз. Также в целях сохранения достаточного ресурса ДА на обратный путь предусматривается определенный резерв.

Сумма времен  $t_1+t_2+t_3+t_4$  является длительностью цикла работы звена ГДЗС  $t_{ц}$ . Минимально необходимое число звеньев ГДЗС для обеспечения непрерывной работы на позициях подачи ОТВ можно оценить из выражения:

$$n = 1 + Ц\left(\frac{t_{ц}}{t_1}\right) = 2 + Ц\left(\frac{t_2+t_3+t_4}{t_1}\right), \quad (2.11)$$

где  $Ц(x)$  – целая часть числа  $x$  (например,  $Ц(2,3) = 2$ ,  $Ц(3,8) = 3$  и т.п.).

Рассмотрим несколько характерных примеров расчетов необходимого количества звеньев ГДЗС на тушение пожаров.

Предположим, имеются следующие длительности фаз:  $t_1 = 30$  мин,  $t_2 = 5$  мин,  $t_3 = 20$  мин,  $t_4 = 10$  мин. Тогда  $t_{ц} = 65$  мин. Из выражения (2.11) получаем:

$$n = 1 + Ц\left(\frac{65}{30}\right) = 2 + Ц\left(\frac{5 + 20 + 10}{30}\right) = 2 + Ц(1,167) = 2 + 1 = 3.$$

Таким образом, для обеспечения непрерывной работы данной позиции подачи ОТВ необходимо три звена ГДЗС.

Очевидно, что в действительности времена  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  являются недетерминированными величинами. Время работы  $t_1$  зависит от многих факторов – интенсивности действий пожарного, его веса и др. Времена  $t_2$  и  $t_4$  зависят от расстояния до пункта восстановления готовности, этажности расположения позиции подачи ОТВ.

Время  $t_3$  обуславливается техническими возможностями заправки баллонов и необходимостью обслуживания звеньев, прибывающих с других участков тушения пожара, а также отдыха газодымозащитников. Учесть все это при определении величины  $n$  представляется возможным с использованием интервального анализа [102], [103] и методов теории вероятностей и математической статистики [104].

Идеей алгебраических действий [105] с интервальными величинами  $[x]=[x^{\min}, x^{\max}]$  является то, что в результате каждого действия также получается интервальная величина  $[y]=f([x_1],[x_2]...)$  границы которой определяются из выражения [105]:

$$\begin{pmatrix} y^{\max} \\ y^{\min} \end{pmatrix} = \alpha_1 \pm \sqrt{3(\alpha_2 - \alpha_1^2)}, \quad (2.12)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – начальные моменты.

Для различных алгебраических действий над парой интервальных величин значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  определяются из таблицы 2.4 [102–104].

Таблица 2.4 – Начальные моменты для определения границ результирующих интервальных величин при попарных действиях над исходными интервальными величинами  $[x_i]$  и  $[x_j]$

Действие	$\alpha_1, \alpha_2$
Сложение, вычитание $[y]=[x_i] \pm [x_j]$	$\alpha_1 = \frac{(x_i^{\min} + x_i^{\max}) \pm (x_j^{\min} + x_j^{\max})}{2};$ $\alpha_2 = \pm \frac{(x_i^{\min} + x_i^{\max})(x_j^{\min} + x_j^{\max})}{2} + \frac{(x_i^{\min} + x_i^{\max})^2 - x_i^{\min} x_i^{\max} + (x_j^{\min} + x_j^{\max})^2 - x_j^{\min} x_j^{\max}}{3}$
Умножение $[y]=[x_i] \cdot [x_j]$	$\alpha_1 = \frac{(x_i^{\min} + x_i^{\max})(x_j^{\min} + x_j^{\max})}{4}; \alpha_2 = \frac{[(x_i^{\min} + x_i^{\max})^2 - x_i^{\min} x_i^{\max}][(x_j^{\min} + x_j^{\max})^2 - x_j^{\min} x_j^{\max}]}{9}$
Деление $[y] = \frac{[x_i]}{[x_j]}$	$\alpha_1 = \frac{x_i^{\min} + x_i^{\max}}{2(x_j^{\min} + x_j^{\max})} \ln \frac{x_j^{\max}}{x_j^{\min}}; \alpha_2 = \frac{(x_i^{\min} + x_i^{\max})^2 - x_i^{\min} x_i^{\max}}{3x_j^{\min} x_j^{\max}}$

По аналогии с выражением (2.11) необходимое число звеньев ГДЗС получаем из выражения:

$$n = 2 + \text{Ц}(y^{\max}), \quad (2.13)$$

где  $y^{\max}$  – правая граница интервальной величины  $[y]=([t_2]+[t_3]+[t_4])/[t_1]$ .

Предположим, что времена  $t_1 \div t_4$  являются интервальными величинами:  $[t_1]=[25; 35]$  мин.,  $[t_2]=[4; 6]$  мин.,  $[t_3]=[18; 22]$  мин.,  $[t_4]=[8; 12]$  мин. Используя выражение (2.12) и таблицу 2.4, находим величину  $[y]$ :

$$[y] = \frac{[4;6] + [18;22] + [8;12]}{[25;35]} = \frac{[22,8;27,2] + [8;12]}{[25;35]} = \frac{[4;6] + [27,2;32,8]}{[15;35]} = \frac{[32,0;38,0]}{[25;35]} = [0,955 ; 1,40].$$

Из выражения (2.13) находим:  $n = 2 + Ц(1,40) = 2 + 1 = 3$ . Таким образом, для непрерывной работы на позиции подачи ОТВ потребуется три звена ГДЗС.

Если полагать, что времена  $t_1 \div t_4$  являются случайными величинами и известны плотности их распределения  $\varphi_1(t_1)$ ,  $\varphi_2(t_2)$ ,  $\varphi_3(t_3)$  и  $\varphi_4(t_4)$ , то плотность распределения  $\varphi(y)$  случайной величины  $y$ , являющейся дробью  $y = (t_2 + t_3 + t_4)/t_1$ , может быть найдена путем действий над случайными величинами [106] – в данном случае это композиция (сложение) и деление или с использованием имитационного моделирования [104].

При известной плотности  $\varphi(y)$  по аналогии с (2.11) и (2.13) число звеньев ГДЗС находим из выражения:

$$n = 2 + Ц(y\beta). \quad (2.14)$$

Величину  $y\beta$  определяем из выражения:

$$\int_0^{y\beta} \varphi(y) dy = \beta, \quad (2.15)$$

где  $\beta$  – доверительная вероятность нахождения числа  $n$ .

Если предположить, что время каждой фазы подчинено экспоненциальному закону [106] с плотностью распределения:

$$\varphi_i(t_i) = \lambda_i \exp(-\lambda_i t_i), \quad i \in [1;4], \quad (2.16)$$

где  $\lambda_i = t_{ci}^{-1}$  – параметр экспоненциального закона, обратно пропорциональный средней продолжительности процесса  $t_{ci}$ , согласно [105], плотность распределения  $\varphi_c(t_c)$  суммарного времени  $t_c = t_2 + t_3 + t_4$  описывается выражением:

$$\varphi_c(t_c) = C_2 e^{-\lambda_2 t_c} + C_3 e^{-\lambda_3 t_c} + C_4 e^{-\lambda_4 t_c}, \quad (2.17)$$

$$\text{где } C_2 = \frac{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)}; \quad C_3 = \frac{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)}; \quad C_4 = \frac{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)}.$$

Плотность распределения  $\varphi(y)$  дроби экспоненциально распределенных случайных величин  $y = t_c/t_1$  [104] имеет вид:

$$\varphi(y) = \lambda_1 \left[ \frac{C_2}{(\lambda_2 y + \lambda_1)^2} + \frac{C_3}{(\lambda_3 y + \lambda_1)^2} + \frac{C_4}{(\lambda_4 y + \lambda_1)^2} \right]. \quad (2.18)$$

С учетом плотности распределения (2.18) выражение (2.15) преобразуется к явному виду:

$$y_{\beta} \left[ \frac{C_2}{\lambda_2 y_{\beta} + \lambda_1} + \frac{C_3}{\lambda_3 y_{\beta} + \lambda_1} + \frac{C_4}{\lambda_4 y_{\beta} + \lambda_1} \right] = \beta. \quad (2.19)$$

Искомая величина  $y_{\beta}$  находится из решения кубического уравнения:

$$x^3 + ax^2 + bx + c = 0, \quad (2.20)$$

где  $x = \lambda_1 / y_{\beta}$ ;  $a = \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 - (C_2 + C_3 + C_4) / \beta$ ;

$b = \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_4 + \lambda_3 \lambda_4 - [C_2(\lambda_3 + \lambda_4) + C_3(\lambda_2 + \lambda_4) + C_4(\lambda_2 + \lambda_3)] / \beta$ ;

$c = \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 - (C_2 \lambda_3 \lambda_4 + C_3 \lambda_2 \lambda_4 + C_4 \lambda_2 \lambda_3) / \beta$ .

Предположим, что времена  $t_1 \div t_4$  распределены по экспоненциальному закону (2.16), а средние продолжительности фаз равны  $t_{c1} = 30$  мин.,  $t_{c2} = 5$  мин.,  $t_{c3} = 20$  мин.,  $t_{c4} = 10$  мин. Тогда  $\lambda_1 = 0,03(3)$  мин<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 0,20$  мин<sup>-1</sup>;  $\lambda_3 = 0,05$  мин<sup>-1</sup>;  $\lambda_4 = 0,10$  мин<sup>-1</sup>. Затем находим:

$$C_2 = \frac{0,20 \cdot 0,05 \cdot 0,10}{(0,05 - 0,20)(0,10 - 0,20)} = 0,06(6);$$

$$C_3 = \frac{0,20 \cdot 0,05 \cdot 0,10}{(0,20 - 0,05)(0,10 - 0,05)} = 0,13(3);$$

$$C_4 = \frac{0,20 \cdot 0,05 \cdot 0,10}{(0,20 - 0,10)(0,05 - 0,10)} = -0,20.$$

С учетом вычисленных величин коэффициенты кубического уравнения (2.20) равны:

$$a = 0,20 + 0,05 + 0,10 - [0,06(6) + 0,13(3) - 0,20] / \beta = 0,35;$$

$$b = 0,20 \cdot 0,05 + 0,20 \cdot 0,10 + 0,05 \cdot 0,10 - [0,06(6) \cdot (0,05 + 0,10) + 0,13(3) \cdot (0,20 + 0,10) - 0,20 \cdot (0,20 - 0,05)] / \beta = 0,035;$$

$$c = 0,20 \cdot 0,05 \cdot 0,10 - [0,06(6) \cdot 0,05 \cdot 0,10 + 0,13(3) \cdot 0,20 \cdot 0,10 - 0,20 \cdot 0,20 \cdot 0,05] / \beta = 10^{-3}(1 - \beta^{-1}),$$

а само уравнение (2.20) принимает вид:

$$1000x^3 + 350x^2 + 35x + 1 = \beta^{-1}. \quad (2.21)$$

Например, при  $\beta = 0,5$  из решения кубического уравнения (2.21) получаем  $x = 0,023$  и  $y_{\beta} = 1,445$ . В итоге из выражения (2.14) находим необходимое число звеньев ГДЗС:

$$n = 2 + \Pi(1,445) = 3.$$

Расчеты, проведенные с применением различных математических подходов, привели к схожему результату, что подтверждает его приемлемую достоверность.

Таким образом показана возможность определения числа звеньев ГДЗС, обеспечивающих непрерывность подачи ОТВ, на основе информации о времени защитного действия СИЗОД, времени выхода из зоны задымления, времени движения на позицию подачи ОТВ, восстановления ресурса СИЗОД, отдыха и возвращения на позицию подачи ОТВ. Показано, что решение данной задачи возможно с использованием интервального анализа и теории вероятностей.

Данный подход применим и к другим задачам пожарной тактики, например, для расчета необходимых СиС при разработке планов тушения пожаров на критически важные объекты. Наглядно показано, что при разработке ПТП для объектов, где при пожаре ожидается задымление, требующее привлечения звеньев ГДЗС, при построении совмещенных графиков необходимо учитывать ограниченное время работы звеньев ГДЗС с использованием СИЗОД в непригодной для дыхания среде. Это позволит с большей объективностью оценивать ход тушения возможного пожара и обосновывать привлечение дополнительных СиС – звеньев ГДЗС и ППО с целью обеспечения непрерывной подачи требуемого расхода ОТВ.

Эта модель может быть применена при учете иных причин, вызывающих перемены в подаче ОТВ, например, окончание запаса ОТВ, повреждение линий подачи ОТВ, периодическое оставление пожарными позиций подачи ОТВ при работе в условиях высоких или низких температур и др. Порядок построения совмещенных графиков с учетом перебоев подачи ОТВ представляется целесообразным включить в новые редакции учебников по подготовке газодымозащитника, пожарной тактике и соответствующие методические документы.

### **2.3 Теоретические основы и технология повышения тактико-технических возможностей пожарной техники для локализации пожаров в зданиях объектов энергетики**

Разработка подходов к повышению тактико-технических возможностей пожарной техники по локализации пожаров объектов энергетики предусматривает создание средств предотвращения распространения пожара и последующего его прекращения без необходимости входа участников тушения пожара в помещение пожара и работы в нем в условиях воздействия ОФП.

Одним из методов локализации пожара в помещении с наличием опасных для жизни и здоровья человека факторов является объемное тушение, не подразумевающее входа человека в помещение пожара. Закономерно, что стационарными средствами не может быть обеспечено объемное пожаротушение всех или большинства помещений объекта энергетики по технико-экономическим соображениям. Поэтому данный метод возможен при объемном пожаротушении от мобильных средств пожаротушения.

Применение объемного тушения в большинстве случаев не может заменить комплекса мер по обеспечению тушения пожара, так как необходимо иметь доступ к помещению пожара, который, как правило, пролегает через задымленные помещения. Тем не менее, возможность прекратить пламенное горение и снизить воздействие ОФП в горящем помещении без присутствия в нем человека в значительной мере позволяет снизить уровень опасности для участников тушения пожара. Объемное тушение может быть реализовано как в стационарном, так и в мобильном варианте.

В качестве ОТВ в стационарных установках пожаротушения применяются [107]:

– распыленная вода для тушения кабельных сооружений, силовых трансформаторов и реакторов, маслобаков турбогенераторов и синхронных компенсаторов, трактов топливоподачи;



– воздушно-механическая пена для тушения резервуаров с нефтепродуктами и мазутных тепляков электростанций;

– газовые составы для тушения подпольных пространств залов электронно-вычислительных машин, систем централизованного контроля, управления и автоматизации автоматизированных систем управления технологическим процессом (если кабели не покрыты огнезащитным составом), контейнеров с газовыми турбинами;

– порошковые составы для тушения агрегатов дизельных электростанций.

Из имеющегося арсенала ОТВ в тушении пожаров по объему применяется только воздушно-механическая пена для тушения нефтепродуктов и газовые составы для локального тушения пожара в объеме помещения с пребыванием в нем инженерно-технического персонала.

Для тушения кабельных сооружений на объектах энергетики используются установки водяного пожаротушения, поскольку вода как ОТВ менее электропроводна в сравнении с воздушно-механической пеной и менее затратна в сравнении с газовыми огнетушащими составами. Кроме этого, кабельные сооружения имеют высокий коэффициент негерметичности, что является ограничением в использовании газовых установок пожаротушения.

Объемное пожаротушение осуществляется автоматическими установками газового пожаротушения, под защитой данных установок, чаще всего, находятся помещения систем контроля и управления.

Установки объемного пожаротушения (кроме азотного и аргонового пожаротушения) применяются для защиты помещений (оборудования), имеющих стационарные ограждающие конструкции с параметром негерметичности не более  $0,044 \text{ м}^{-1}$  [108]. Для установок азотного и аргонового пожаротушения параметр негерметичности не должен превышать  $0,001 \text{ м}^{-1}$ . Отчасти такие меры продиктованы стоимостью огнетушащих составов.

Поэтому перспективной представляется реализация возможностей объемного пожаротушения от мобильных средств пожаротушения, так как подача ОТВ

может быть обеспечена в любое помещение объекта энергетики. Сложность реализации состоит в создании требуемого запаса ОТВ, которое сможет обеспечить огнетушащую концентрацию в помещении пожара, а также герметичности помещения пожара [108]. Производители пожарных автомобилей выпускают автомобили газового тушения, где в качестве огнетушащего состава используется сжиженная двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ). Однако статистические данные по тушению пожаров подтверждают отсутствие таких автомобилей в подразделениях пожарной охраны. Кроме того, в научной и технической литературе отсутствуют данные по количеству ликвидированных пожаров установками объемного (газового) пожаротушения.

Выбор ОТВ, подаваемого в зону горения от мобильной пожарной техники осуществляется, исходя из следующих предпосылок:

- на мобильном средстве должно находиться достаточное количество ОТВ для тушения пожара;
- возможность взаимодействия ОТВ с горючим материалом для достижения целей тушения пожара.

Согласно статистическим данным пожарные автомобили, использующие в качестве ОТВ воду, применяются в тушении пожаров в несколько раз чаще, чем автомобили пенного, порошкового или комбинированного тушения. Статистические данные за последние 10 лет показывают, что при тушении пожаров в 99 % случаев применяются пожарные автоцистерны, автонасосы и насосные станции. Это подтверждает, что вода является основным ОТВ [9–12].

Наиболее распространенными ОТВ при тушении пожаров являются распыленная и тонкораспыленная вода, воздушно-механическая пена, порошковые составы. Проведенный анализ показывает, что автомобили порошкового тушения применялись в среднем в 0,029 % случаев по отношению к автоцистернам, автонасосам и насосным станциям, а автомобили комбинированного тушения – только в 0,01 %.

Наиболее эффективным и распространенным средством тушения пожаров на

объектах остается вода, благодаря ее доступности, дешевизне, подвижности, химической нейтральности и отсутствию токсичности. При этом вода, как ОТВ, применяется чаще всего в качестве средства поверхностного тушения.

В ряду возможных способов объемного тушения пожаров также применяется паротушение. Особенностью установки паротушения является подключение ее к постоянно действующим производственным паропроводам [109]. Место подключения на технологических установках выбирается в пределах данной установки, а к паропроводной сети предприятия – в пределах не более 50 м от границы установки или объекта. Для тушения пожара в системах паротушения применяется насыщенный, отработанный водяной пар или перегретый пар технологического назначения. При этом насыщенный водяной пар является более эффективным для пожаротушения по сравнению с перегретым паром.

Для подачи пара в закрытые помещения перфорированные трубы прокладываются по всему внутреннему периметру помещения на высоте 0,2–0,3 м от пола. При этом отверстия труб располагаются так, чтобы выходящие из них струи пара были направлены горизонтально внутрь помещения. Основным показателем системы паротушения является интенсивность подачи пара, которая определяется в зависимости от наличия проемов, либо их отсутствия. Системы паротушения имеют существенные недостатки, такие как:

- защищаемый объем помещения не должен превышать 500 м<sup>3</sup>;
- ограничение расстояния между местом подключения и защищаемым помещением;
- размещение внутренних распределительных паропроводов на путях движения обслуживающего персонала;
- опасность пара для людей.

Указанные недостатки тушения паром удалось устранить при использовании в качестве ОТВ водной среды в метастабильном фазовом состоянии (ВСМФС). Преимущества ВСМФС как средства прекращения горения и снижения ОФП позволяют исследовать возможность ее применения на объектах энергетики [110].

Этот термин используется для водной среды, полученной в установке за счет

«мгновенного перехода» в область метастабильного состояния и последующего взрывного вскипания [110–112]. После такого процесса вода приобретает уникальные свойства не только за счет получения капель микронного размера, но и за счет изменения структуры воды. Вода приобретает свойства аналогичные тем, которые в природе вода приобретает в поровых породах при высоких температурах и давлениях [113]. Следовательно, сущность способа получения уникальных свойств ВСМФС заключается в том, что пресная вода вследствие ее нагревания в специальном теплообменнике при определенном сочетании температуры (более 165 °С) и давления (более 1,6 МПа) изменяет свои свойства. После возвращения к обычным, атмосферным условиям, такая вода находится некоторое время в особом, так называемом, метастабильном состоянии, проявляющемся в повышенной растворяющей способности карбонатов, сульфатов, силикатов и других соединений, в способности длительно удерживать в своем составе аномальные количества растворенного вещества (больше в 300÷500 раз). Такая вода в работе академика Летникова Ф.А. [113] названа активированной, а сам процесс – температурной активацией.

При подаче такой воды через стволы-распылители, в которых давление воды быстро (за несколько миллисекунд) уменьшается до атмосферного, происходит почти мгновенное вскипание воды. Такое вскипание в работах академика Скрипова В.П. названо взрывным вскипанием [114, 115]. В результате взрывного вскипания одна часть воды переходит в переохлажденный пар (до 30 %), а другая часть дробится на капли диаметром 0,01–10 мкм и в результате формируется струя паровоздушнокапельной смеси (струя ВСМФС). Так как диаметр капель составляет менее 10 мкм, то ВСМФС витает в воздухе и многими наблюдателями ошибочно воспринимается как пар. ВСМФС долго не осаждается (по экспериментальным данным не менее 40 минут) [112], огибает без осаждения препятствия, не оседает на вертикальных и горизонтальных плоскостях, даже при подаче на горизонтальные поверхности стремится вверх. Устойчивость водной среды в метастабильном фазовом состоянии и возможность заполнения ею больших объемов таковы, что при подаче 1,8 кг/с в объем 3200 м<sup>3</sup> 100% влажности удалось достичь через три минуты.

Эксперименты подтвердили, что ВСМФС обладает уникальными свойствами, которые позволяют реализовать принципиально новые способы пожаротушения, которые не могут быть одновременно реализованы известными способами [116].

Технология получения ВСМФС реализована в мобильном средстве пожаротушения – автомобиле пожарном многоцелевом (АПМ) с установкой получения ВСМФС (рисунок 2.19) и комплектом оборудования, позволяющего осуществлять подачу ВСМФС внутрь помещений (рисунок 2.20).



Рисунок 2.19 – Автомобиль пожарный многоцелевой

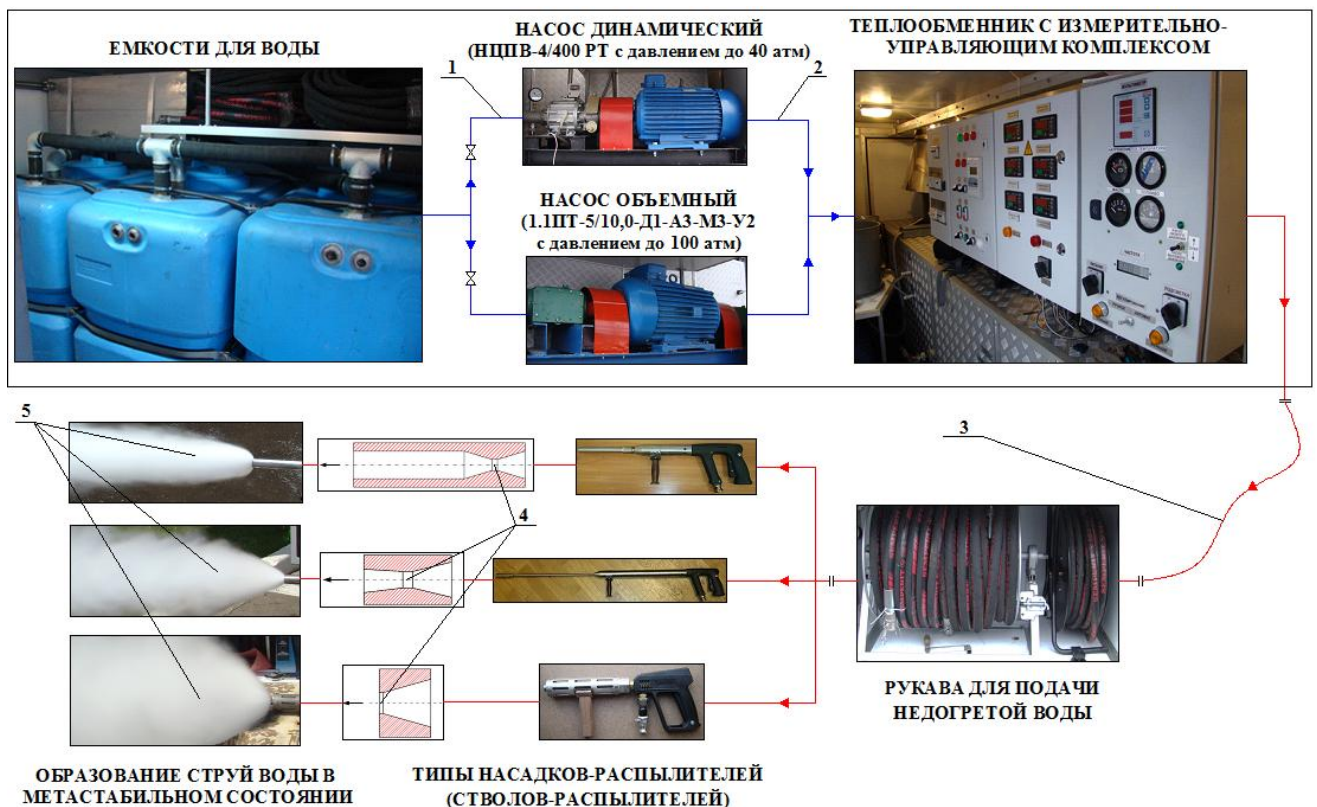


Рисунок 2.20 – Установка получения ВСМФС

1–5 – параметры воды в соответствии с данными таблицы 2.5

Таблица 2.5 – Данные о параметрах воды в установке получения ВСМФС

№	Температура $t$ , °С	Давление $P$ , МПа	Состояние	Время $\tau$ , с
1	4–60	0,01	Вода	1–3
2	4–60	4,0–10,0	Вода	3–5
3	165–280	1,6–10,0	Недогретая вода	40–60
4	165–280	0,6–1,9	Перегретая вода (взрывное вскипание)	$10^{-4}$ – $10^{-9}$
5	$\leq 60$	0,01	ВСМФС	300–2400

Для изучения эффекта подавления горения посредством ВСМФС было проведено изучение механизма подавления пламенного горения на известных моделях тушения пожаров различных материалов. Для примера разобран механизм тушения пролива горючей жидкости, как одного из вероятных сценариев пожара на объекте энергетики.

Существуют различные аналитические модели, описывающие тушение пролива горючей жидкости распыленной водой. Рассмотрим одну из этих моделей, которая учитывает тушение различных жидкостей распыленной водой за счет охлаждающего эффекта.

Установлено, что при тушении горючих жидкостей основную роль играет механизм охлаждения их поверхности [117]. Данный процесс можно упрощенно представить следующим образом: капли воды, испаряясь на поверхности жидкости, отбирают тепло, тем самым снижая температуру поверхности жидкости и, как следствие, уменьшая количество паров, поступающих в зону горения. В свою очередь, уменьшение концентрации горючих паров вызовет уменьшение скорости реакции, тепловыделения и температуры пламени. Таким образом, обеспечение достаточного отвода тепла от поверхности жидкости, при котором паров горючего вещества будет не достаточно для поддержания теплового равновесия между пламенем и окружающей средой, приводит к прекращению горения, другими словами, тушение пламени наступает при понижении температуры поверхности до некоторой величины  $T_p$ .

Описать тепловое состояние жидкости возможно с помощью уравнения теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + cm \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.22)$$

где  $c$  – теплоемкость жидкости;

$\rho$  – плотность жидкости;

$\lambda$  – теплопроводность жидкости;

$T$  – температура;

$x$  – координата;

$\tau$  – время;

$m$  – массовая скорость выгорания жидкости.

В уравнении (2.22) теплофизические характеристики и скорость выгорания приняты постоянными и равными средним значениям, лежащим между температурой кипения и температурой поверхности жидкости, соответствующей затуханию пламени. В направлениях  $y, z$  среду можно считать бесконечной, что соответствует реальным условиям тушения проливов жидкостей.

Начальные и граничные условия принимаются:

$$\tau = 0, T = T(x); \quad (2.23)$$

$$x = \infty, T = T_\infty, \quad (2.24)$$

где  $T_\infty$  – температура жидкости при  $x = \infty$ .

Другое граничное условие выведем исходя из баланса тепловых потоков на поверхности жидкости:

$$x = 0, -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q - mH - Jr, \quad (2.25)$$

где  $q$  – тепловой поток, передаваемый пламенем к поверхности жидкости;

$H$  – теплота испарения горючей жидкости;

$J$  – интенсивность орошения или масса воды, подаваемая на единицу площади поверхности топлива в единицу времени;

$r$  – теплота испарения воды.

В уравнении (2.25) тепловой поток ( $q$ ) является неизвестной величиной. Для его определения в работе [118] ввели допущение, что поток ( $q$ ) не меняется от момента начала тушения до его окончания. Данное допущение не является грубым, так как температура пламени незначительно отличается от температуры затухания

[119]. Следовательно, величину  $q$  можно определить как:

$$q = m[H + c(T_k - T_\infty)], \quad (2.26)$$

где  $T_k$  – температура кипения горючей жидкости.

В работе [118] более подробно изложена аналитика процесса тушения различных горючих жидкостей распыленной водой, где приводится уравнение времени тушения:

$$t = -\frac{4}{3} \left[ \frac{\theta_s}{\alpha_0} + \ln \left( 1 - \frac{\theta_s}{\alpha_0} \right) \right], \quad (2.27)$$

где  $\alpha_0$  – безразмерная интенсивность орошения ( $\alpha_0 = Jr/[cm(T_k - T_0)]$ );

$\theta_s$  – температура поверхности, соответствующая затуханию пламени.

Приведенными теоретическими выводами показана сама возможность тушения горючих жидкостей обычной водой за счет охлаждающего эффекта. Также в работах [120,121] приводятся данные о других механизмах гашения пламени, которые задействуются при подаче воды, точнее, водяного пара в зону горения. Так в работе [121] приводится подтверждение, что пары воды являются ингибитором горения, причем ингибирующий эффект воды не противопоставляется известным ранее механизмам тушения (поглощение тепла, разбавление смеси). Ингибирующий эффект наблюдается при определенных условиях (состояние воды), которые достаточно подробно рассмотрены в работе [120]. В работах [120, 121] приводятся результаты экспериментов по изучению ингибирующего эффекта воды при подаче ее в защищаемый объем с температурой свыше 100 °С под давлением на линии насыщения. В результате распыла воды при таких параметрах не создавались условия для взрывного вскипания и, как следствие, из-за существенных теплопотерь при фазовом переходе (фазовые переходы начинались еще до выхода из сопла), резко снижалось количество пара, получаемого из распыленной воды.

Технология получения ВСМФС не имеет данного недостатка, так как вода подается к соплу с температурой свыше 170 °С и под давлением не менее 1,6 МПа, что обеспечивает степень недогрева воды более чем в два раза до линии насыщения. В результате распыла воды с такими параметрами получается водный аэрозоль с приведенными ранее характеристиками и со значительной долей пара (не менее



20 % распыляемой воды переходит в пар при взрывном вскипании).

Механизм объемного воздействия на пожар в помещении (так называемый внутренний пожар) при использовании ВСМФС-технологии состоит из двух последовательных этапов:

1) заполнение объема средой ВСМФС, направленное на подавление пламенного горения. Тактику тушения ВСМФС по объему помещения можно сравнить с заполнением объема пеной высокой кратности.

Осуществляется заполнение объема средой ВСМФС с трехкратным запасом ( $K=3$ ) за время, не превышающее 40 минут, что позволяет заполнить объем до 8 тыс. м<sup>3</sup>. Этого достаточно для предотвращения пламенного горения большинства видов горючих нагрузок твердых горючих материалов, снижения температуры, осаждения значительной части дыма;

2) достижение и поддержание огнетушащей интенсивности для предотвращения тления и горения частично скрытых объемов (щели, карманы, пустоты и др.).

Нормативная интенсивность подачи ВСМФС для тушения на различных объектах объемным и поверхностным способом при дымоосаждении и осаждении облака АХОВ является одним из наиболее важных показателей в расчете сил и средств, требуемых для тушения пожаров, осаждении облака АХОВ, разбавлении взрывоопасных концентраций, времени подачи ВСМФС.

Основными факторами, определяющими интенсивность подачи ВСМФС, являются:

- физико-химические свойства горючего;
- условия горения и тепловой режим в зоне пожара к моменту подачи ВСМФС;

- способ и условия подачи ВСМФС для локализации и ликвидации горения.

Доведение подачи стволов ВСМФС до постоянства в пределах поддержания требуемой интенсивности позволит решить следующие задачи на пожаре:

- доведение интенсивности подачи до установленных значений для определенного вида огнетушащего вещества, отнесенных к объему помещения;
- поддержание интенсивности подачи с учетом негерметичности помещения.

Увеличения интенсивности подачи следует добиваться введением дополнительных приборов подачи ВСМФС, причем места их введения предпочтительно выбирать в нижней части помещения, где вероятнее всего происходит подсос воздуха в зону горения [122].

Таким образом, на основе теоретического обзора можно заключить, что парокапельные струи воды в метастабильном фазовом состоянии, полученные в результате взрывного вскипания, могут стать эффективным средством объемного тушения пожаров на объектах энергетики по ряду причин:

- обладая малой инерционностью капли ВСМФС размерами от 0,01 до 10 мкм с «легкостью» будут заполнять сложные геометрические объемы, не осажаясь на стенках ограждающих конструкций;
- теоретические и экспериментальные данные показали, что среда ВСМФС устойчива при заполнении замкнутых объемов (не менее 40 мин. находится во взвешенном состоянии);
- обеспечивается повышенная теплоотдача за счет малых размеров капель;
- значительная часть воды переходит в пар (не менее 20 %), что приводит к повышению эффективности гашения пламени за счет ингибирования.

## **2.4 Теоретические основы локализации пожаров в зданиях объектов энергетики**

Тушение пожаров является заключительной составляющей системы обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики, поэтому по обеспечению своевременной локализации пожаров иногда составляется суждение о функционировании системы обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики в целом.

Тушение пожара на объекте энергетики может быть осуществлено автоматически при наличии на объекте систем автоматического пожаротушения, либо сотрудниками предприятия, обнаружившими пожар, и подразделениями пожарной охраны, а также их комбинацией.

Установками автоматического пожаротушения (АУПТ) оснащаются наиболее пожароопасные помещения. При срабатывании АУПТ должны обеспечивать интенсивность подачи ОТВ в защищаемый объем не менее установленного предела в течение расчетного времени для обеспечения локализации и ликвидации возможного возгорания. Предполагается, что в случае возникновения пожара в защищаемом помещении он будет локализован и ликвидирован в короткие сроки без участия персонала объекта и подразделений пожарной охраны. Данный способ имеет как преимущества, так и недостатки, и не может быть применен повсеместно. Кроме этого, работа АУПТ требует контроля успешности срабатывания и не исключает необходимости оказания первой помощи пострадавшим от пожара и проведения технологических переключений, сохраняющих работоспособность объекта энергетики.

Большое влияние на характер распространения пожара имеет время его скрытого развития, то есть промежуток времени от момента возникновения до обнаружения пожара, а также своевременность и адекватность действий лица (лиц), обнаружившего(-их) возгорание. Так как развитие пожара является динамическим процессом, основанным на реакции окисления, происходящей по цепному типу, на пожарах выделяется «начальная стадия пожара». Четкого определения термина «начальная стадия пожара» нормативные документы не содержат. В учебной литературе при определении параметров пожара под начальной стадией понимают десятиминутный промежуток времени после возникновения горения. В этот период времени пожар имеет сравнительно небольшие размеры, а скорость распространения пламени значительно ниже справочных данных (за исключением горения легковоспламеняющихся, горючих жидкостей и горючих газов) [92].

С точки зрения тушения пожара именно начальная стадия является наиболее приемлемым временем для подачи ОТВ, когда пожар можно ликвидировать наименьшим количеством СиС. Однако возникает проблема, когда ППО не могут прибыть за это время, что может быть вызвано рядом причин, например, значительной удаленностью объекта, поздним сообщением о пожаре, отсутствием дорог с твердым покрытием и др. В этих случаях основной и зачастую единственной силой,

которая может осуществить действия по предотвращению распространения пожара в начальной стадии, является персонал объекта энергетики.

В некоторых случаях по причинам, связанным как с характером развития пожара, так и со степенью готовности к такому чрезвычайному событию, персонал объекта энергетики не может справиться с локализацией загорания. В этих случаях основной силой, осуществляющей тушение пожаров, является пожарная охрана, а определяющим принципом создания и размещения подразделений пожарной охраны – баланс затрат и возможностей. Данный баланс представлен в СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения» [30] и СП 232.1311500.2015 «Пожарная охрана предприятий. Общие требования» [31], разработанными в развитие требований Федерального закона от 22 июля 2008 г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [17].

Тушение пожаров объектов энергетики осуществляют территориальные и объектовые ППО. При возникновении пожара на крупном объекте энергетики первым прибывает объектовое ППО, затем – территориальные. При определении мест дислокации территориальных ППО для каждого объекта предполагаемого пожара рассчитывается максимально допустимое расстояние от него до ближайшего пожарного депо, в зависимости от цели выезда дежурного караула на пожар и выбранной схемы его развития. Максимально допустимое расстояние от объекта предполагаемого пожара до ближайшего пожарного депо определяется для одной или одновременно нескольких из нижеприведенных целей выезда дежурного караула на пожар:

- 1) ликвидация пожара до превышения значения его площади такой, которую может потушить один дежурный караул;
- 2) ликвидация пожара прежде, чем наступит предел огнестойкости строительных конструкций в помещении пожара;
- 3) ликвидация пожара прежде, чем ОФП достигнут критических для жизни людей значений.

Первая цель должна достигаться всегда и, как самостоятельная (и единственная), она обычно реализуется при тушении пожара на открытом пространстве, когда время его ликвидации не ограничено, а также в зданиях (сооружениях) большой площади, с высокими пределами огнестойкости строительных конструкций и при отсутствии людей, которых необходимо эвакуировать силами дежурного караула (производственные и складские помещения большого объема).

Третья цель подлежит реализации при тушении пожаров в зданиях с массовым пребыванием людей, когда расчетное время их эвакуации из здания больше необходимого времени эвакуации (то есть когда опасность для жизни людей наступает до того, как они эвакуируются из здания), и их эвакуация не завершилась до прибытия ППО, а также при ликвидации пожаров в помещениях, из которых эвакуация людей невозможна без причинения вреда их жизни или нецелесообразна по условиям технологического процесса.

Первую цель выбирают для всех открытых пожаров (вне зданий и сооружений). Первую и вторую – для всех внутренних (закрытых) пожаров (внутри зданий и сооружений). Одновременное достижение всех целей выбирают для внутренних пожаров только в том случае, когда эвакуация людей из помещения пожара невозможна без причинения вреда их жизни (помещения с послеоперационными больными, подключенными к аппаратам искусственного поддержания жизнедеятельности организма, помещения с людьми в барокамерах и т.п.) или нецелесообразна по условиям технологического процесса [30].

Очевидно, что среди целей нет такой, которая напрямую решала бы задачу сохранения работоспособности объекта или минимизации времени его остановки, в том числе критически важного объекта, обеспечивающего жизнедеятельность большого числа людей далеко за его пределами. Анализ постановки вышеуказанных целей и их комбинации показал, что даже в скрытом виде такую задачу разработчики нормативных документов [30], [31] перед собой не ставили. Это вполне объяснимо тем, что документы разрабатывались для широкого круга, как правило, типовых задач ПО. Задача же сохранения работоспособности объекта или минимизации времени его остановки может считаться специфической, но, как показывает практика, весьма значимой для сохранения благополучия населения.

Достижение третьей цели в подавляющем большинстве случаев позволит сохранить работоспособность объекта энергетики, однако для этого может потребоваться больше ресурсов, чем только для сохранения работоспособности объекта энергетики. Это связано с тем, что для достижения этой цели действия по спасению должны быть организованы до наступления действия на человека первого из ОФП. Данную особенность следует предусматривать в нормативных документах по пожарной безопасности введением соответствующей цели выезда ППО на пожар (как правило, для территориальных ППО), либо учитывать ее в специфике обеспечения тушения пожаров объекта энергетики при формировании сил соответствующего объектового ППО.

Другой важной составляющей системы тушения пожаров являются ППО по охране от пожаров организаций, которые создаются в соответствии с разделом 6 СП 232.1311500.2015 «Методики определения численности и технической оснащенности пожарной охраны предприятия для организации и осуществления тушения пожаров» [31]. В соответствии с этой методикой выбирают наиболее пожароопасный объект на территории предприятия, характеризующийся наибольшей возможной площадью пожара и наиболее высокой скоростью распространения пламени, и схему развития пожара в соответствии с пожарной нагрузкой, характерной для выбранного объекта. После этого выбирают скорость следования пожарных автомобилей к месту предполагаемого пожара в зависимости от типа дорожного покрытия и рассчитывают время начала эффективных действий по тушению пожара (интервал времени от момента возникновения пожара до момента подачи ОТВ в очаг пожара) по формуле:

$$t_{\text{нач}} = t_{\text{об}} + t_{\text{с}} + t_{\text{сб}} + t_{\text{сл}} + t_{\text{р}}, \quad (2.28)$$

где  $t_{\text{об}}$  – время с момента возникновения пожара до момента его обнаружения, мин;  
 $t_{\text{с}}$  – время с момента обнаружения пожара до момента сообщения о нем в пожарную охрану, мин;

$t_{\text{сб}}$  – время сбора личного состава по тревоге, мин;

$t_{\text{сл}}$  – время следования подразделения пожарной охраны от места получения сообщения о пожаре (от пожарного депо) до места пожара, мин;

$t_p$  – время с момента прибытия на пожар до момента подачи первого ствола в очаг пожара (время разворачивания сил и средств), мин.

К моменту начала действий по тушению пожара рассчитывают площадь пожара в соответствии с выбранной схемой его развития, требуемый расход ОТВ для тушения пожара, количество стволов, необходимых для тушения и защиты от возгорания смежных или соседних помещений или строений, количество пожарных автомобилей, необходимых для тушения пожаров на предприятии, по сумме расходов ОТВ на тушение пожара и защиту от возгорания смежных или соседних помещений или строений, численность участников тушения пожара, занятого на проведении различных видов боевых действий с учетом сложности и опасности этих действий [31]. Далее на основе этих расчетов определяют общую численность личного состава ПО предприятия. Тип и количество пожарных автомобилей ППО на предприятиях определяются с учетом привлекаемых для тушения пожара сил территориальных ППО (поселения или городского округа) [31].

Рассмотренная методика сопоставляет параметры развития пожара с прибытием первого ППО, и также, как в случае с методикой, определяющей дислокацию ППО, не ставит целью ликвидацию пожара объекта энергетики в тех размерах, которые не приведут к остановке технологического процесса выработки энергии. Общим подходом к осуществлению своевременного тушения пожара на объекте энергетики является организация тушения пожара, которая не приведет к остановке технологического процесса выработки энергии. Этого можно достигнуть постановкой и организацией выполнения соответствующей цели. Реализовать цель можно своевременностью подачи достаточного количества огнетушащих средств, которая складывается из достаточности ОТВ, средств их подачи и возможности доступа к зоне горения. При этом следует учитывать сценарии резкого развития пожара, не предусмотренные принятой моделью. В этом случае, как правило, предотвратить остановку технологического процесса выработки энергии объектом энергетики не представляется возможным.

Постановка цели ликвидации пожара объекта энергетики в тех размерах, которые не приведут к остановке технологического процесса выработки энергии, также будет способствовать постановке расчетного сценария развития пожара,

приводящего к остановке процесса, и учету данного сценария при проектировании объектового подразделения пожарной охраны (рисунок 2.21).

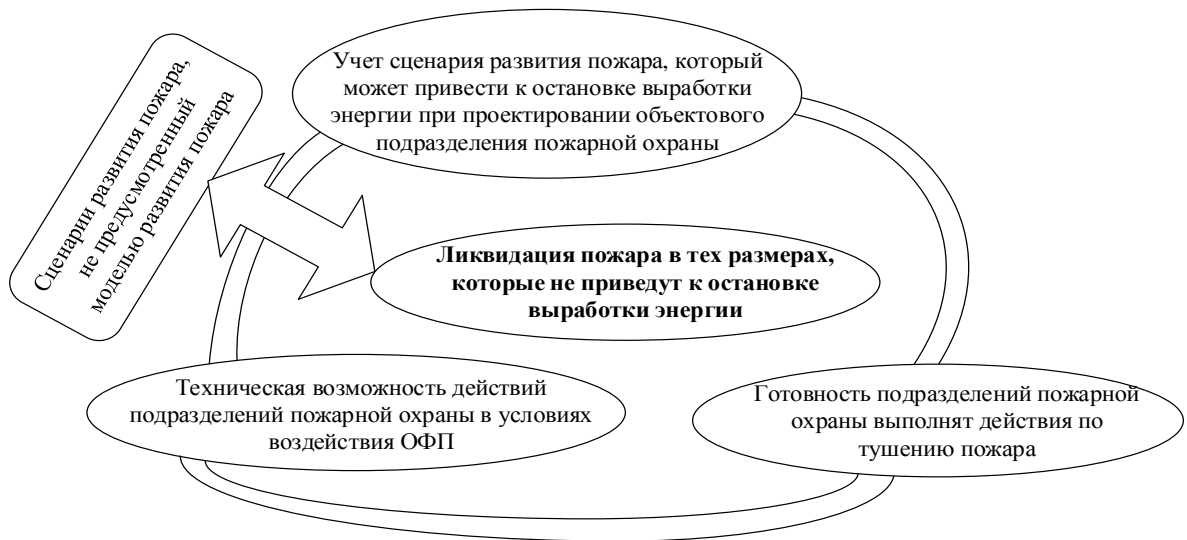


Рисунок 2.21 – Общий подход к обеспечению тушения пожара объекта энергетики

Таким образом, предлагаемую дополнительную цель выезда дежурного караула на пожар объекта энергетики, либо другого объекта, остановка технологического процесса на котором может повлиять на благополучие населения и организаций за пределами объекта, в порядке выполнения основных целей выезда логично и целесообразно разместить между второй и третьей целями.

Рассмотрим механизм достижения предлагаемой дополнительной цели выезда дежурного караула на пожар. Доступ к зоне горения складывается из технической возможности действий ППО в условиях воздействия ОФП и их готовности к выполнению этих действий. Таким образом, основой обеспечения тушения пожаров объектов энергетики является совокупность наличия достаточных СиС ПО к своевременному тушению пожара и соответствующая готовность этих СиС на фоне особенностей тушения пожаров объекта энергетики.

Для достижения цели ликвидации пожара в тех размерах, которые не приведут к остановке технологического процесса выработки энергии, в настоящем параграфе будут рассмотрены подходы к моделированию процесса развития и тушения пожара объекта энергетики, к систематизации оперативно-тактических приемов и инженерно-технических мероприятий при тушении пожаров объектов энергетики, которые предполагается свести в метод локализации пожаров в зданиях объектов энергетики.



Рассматриваемый аспект исследований представляет собой набор событий, который занимает определенную область, и разброс вероятностей появления каждого события, скорее всего, не подчиняется известным законам распределения.

За последние два десятилетия объем научных исследований и информации о режиме техногенных катастроф существенно возрос. В результате статистического анализа данных установлено, что эмпирические распределения физических величин катастроф и значений ущербов описываются, как правило, распределениями, известными в теории вероятностей как распределения с тяжелыми хвостами. Математически это означает, что соответствующие распределения могут быть описаны степенным законом Парето с показателем степени распределения меньше единицы. Средние значения и величины дисперсии для таких распределений бесконечны, что приводит к неприменимости обычных методов статистического анализа, основанных на использовании выборочных средних значений и дисперсии [98]. Вместо средних значений и дисперсии в качестве робастных характеристик описания распределений с тяжелыми хвостами следует использовать медианы (50 % квантиль распределения) и величины разброса, оцениваемые квантилями (50±8) %. Обсуждается возможность моделирования распределений случайных величин с так называемыми «тяжелыми хвостами» при помощи одномерных устойчивых законов [123]. Наличие тяжелых хвостов у плотности распределения вероятности (ПРВ) случайной величины  $X$  существенно затрудняет ее компьютерное моделирование. Хвосты у ПРВ обычно появляются в результате обработки экспериментальных гистограмм, когда выясняется, что полученные данные хорошо соответствуют нормальному закону лишь в центральной части области распределения случайной величины  $X$   $[-X_m; X_m]$ . Иллюстрацией служит рисунок 2.22, где показаны экспериментальная гистограмма и два варианта ее аппроксимации [123], [124].

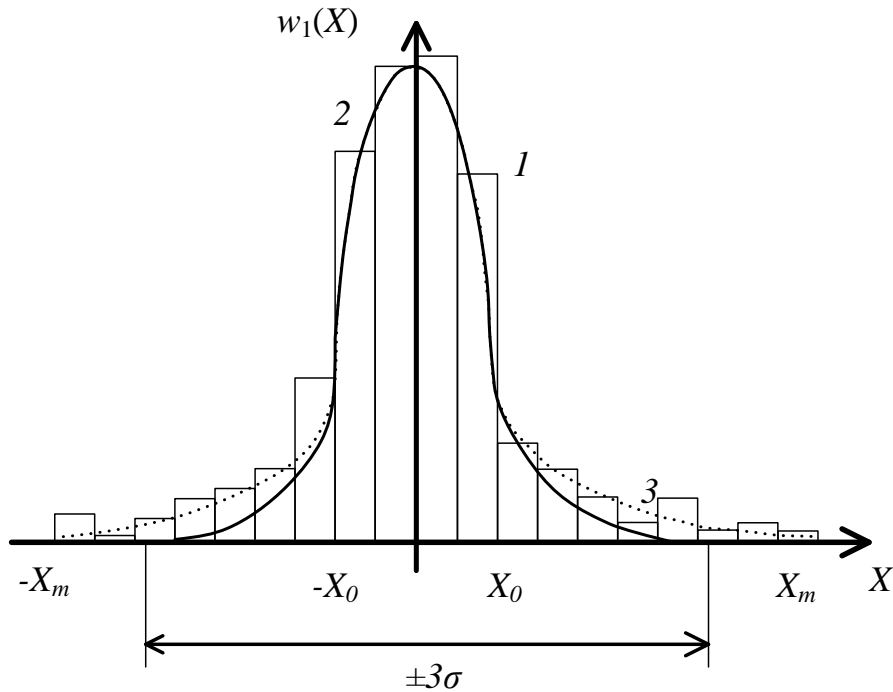


Рисунок 2.22 – Симметричная ПРВ  $w_1(X)$  с тяжелыми хвостами справа и слева:

1 – экспериментальная гистограмма; 2 – нормальный закон (сплошная линия);

3 – тяжелый хвост реальной ПРВ (точечная кривая) [123]

На практике ситуация осложняется и тем, что центральная область является статистически хорошо насыщенной, а краевые области более «бедны», поскольку соответствуют существенно меньшему объему полученных данных (гистограммы здесь часто являются решетчатыми, «дырявыми», с выбросами и пропусками), что экспериментатор обычно связывает с несовершенством методики и малым временем проведения измерений [123].

Появление тяжелого хвоста объясняется методическими и инструментальными погрешностями при проведении экспериментов. Логика здесь такова: поскольку тенденция к нормализации ПРВ наблюдается, начиная с трех и более факторов, влияющих на результаты измерений, условия применимости центральной предельной теоремы (ЦПТ) теории вероятностей (ТВ) выполняются практически всегда и закон нормального распределения должен иметь место, отклонения от него – это выбросы или ошибки, на которые не следует обращать внимание. Методики обработки статистических данных в развитие этой идеи предлагают даже отбрасывать оговоренное число минимальных и максимальных значений  $X$ , искус-

ственно «подгоняя» эксперимент под условия ЦПТ ТВ. При этом корректно избавиться от тяжелых хвостов удастся далеко не всегда.

Проблему тяжелых хвостов ПРВ можно решить тремя способами: обеспечивая соответствие условий проведения эксперимента условиям применимости ЦПТ ТВ; аппроксимируя экспериментальные гистограммы совокупностью заданных вероятностных функций; используя финитные модели, построенные на основе одномерных устойчивых распределений, соответствующих условиям применимости, обобщенной ЦПТ ТВ [125–132].

Для моделирования процесса тушения пожаров объектов энергетики в части обработки статистических данных также представляется возможным использовать вышеописанную теорию, а именно с учетом статистики пожаров на объекте энергетики и тактических характеристик пожарно-спасательного гарнизона оценить с помощью полиинтервального метода вероятность исхода тушения пожара. Достаточно подробно полиинтервальный метод рассмотрен, в частности, в работах Левина В. И. [133–136].

Для решения поставленной задачи в настоящей работе использована математическая модель неопределенности систем в виде полиинтервалов совместно с математическим аппаратом, позволяющим выполнять различные операции над полиинтервалами [32]. Известно, что интервальная математика строится на основе понятия интервала, рассматриваемого как множество всех возможных значений не полностью определенной величины  $\tilde{a}$ , задаваемой только ее нижней ( $a_1$ ) и верхней ( $a_2$ ) границами. Соответственно этому величина  $\tilde{a}$  записывается в форме ограниченного интервала неопределенности вида:

$$\tilde{a} = [a_1, a_2] = \{a \mid a_1 \leq a \leq a_2\}. \quad (2.29)$$

Здесь предполагается, что неизвестное «истинное» значение неопределенной величины  $\tilde{a}$  достоверно лежит в пределах интервала  $[a_1, a_2]$ , не выходя за его границы ( $a_1$ ) и ( $a_2$ ). Причем все значения в пределах этого интервала считаются «равновозможными» в том смысле, что нет никаких оснований предпочитать одно значение другому. Заметим, что в данном случае понятие равновозможности не означает задание равномерного вероятностного или какого-либо иного распределения

возможных значений внутри указанного интервала. Над интервалами вида (2.29) вводятся алгебраические операции, аналогичные соответствующим операциям над числами. Для этого используется теоретико-множественная конструкция:

$$\tilde{a} \circ \tilde{b} = \{a \bullet b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, \circ \tilde{a} \{ \bullet a \mid a \in \tilde{a} \}, \quad (2.30)$$

То есть любая операция над интервалами  $\circ$  определяется на основе соответствующей операции над точными величинами  $\bullet$ , при условии, что конкретные значения этих величин приобретают все возможные значения из соответствующих интервалов. Из этого определения вытекают простые правила выполнения операций над интервалами:

$$\begin{aligned} [a_1, a_2] + [b_1, b_2] &= [a_1 + b_1, a_2 + b_2]; \quad [a_1, a_2] - [b_1, b_2] = [a_1 - b_1, a_2 - b_2]; \\ k \cdot [a_1, a_2] &= \begin{cases} [ka_1, ka_2], & k > 0, \\ [ka_2, ka_1], & k < 0; \end{cases} \quad [a_1, a_2] \cdot [b_1, b_2] = \left[ \min_{i,j} (a_i \cdot b_j), \max_{i,j} (a_i \cdot b_j) \right]; \\ [a_1, a_2] / [b_1, b_2] &= [a_1, a_2] / [1/b_2, 1/b_1], \text{ при } 0 \notin [b_1, b_2]. \end{aligned} \quad (2.31)$$

В работах [134–136] предлагается дальнейшее развитие интервальной математики, вводится понятие полиинтервала как последовательности нескольких одиночных интервалов неопределенности:

$$\tilde{M} = \{\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n\}, \quad (2.32)$$

где  $\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n$  – интервал вида, представленного в формуле (2.30).

Операции над многомерными интервалами в работах Левина В. И. [133–136] предложено проводить аналогично операциям над моноинтервалами вида, представленными в формуле (2.30). Ограничение операций с полиинтервалами заключается в следующем – полиинтервалы, над которыми производятся математические операции, должны содержать интервалы с одинаковым количеством переменных.

Учитывая, что систему обеспечения тушения пожаров объектов энергетики можно представить в виде массива данных, составляющих многочисленные интервалы со случайным распределением внутри них количественных данных, то применение полиинтервального исчисления наиболее близко к рассматриваемым в работе проблемам. Таким образом, решение задачи по определению состава сил и

средств пожарной охраны для тушения пожаров объектов энергетики возможно и целесообразно осуществить на основе полиинтервального метода.

Общая методология исследования складывается в виде тактико-технического принципа формирования сил и средств, способных осуществить локализацию возникающего пожара на объекте энергетики с учетом сохранения его работоспособности, включающего:

- применение способов и совершенствование средств защиты персонала объектов и пожарных от воздействия опасных факторов пожара и их сопутствующих проявлений;

- обеспечение готовности участников тушения пожаров объектов энергетики, а также их оперативного взаимодействия;

- применение способов и средств, повышающих тактические возможности персонала объектов и пожарных, по локализации пожаров объектов энергетики с учетом специфики их развития;

- обоснование состава сил и комплекса средств, способных с учетом дислокации подразделений пожарной охраны осуществить локализацию и ликвидацию возникающего пожара на объекте энергетики, с целью сохранения его работоспособности.

### **ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОСОБОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ УЧАСТНИКОВ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ ОТ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА**

#### **3.1 Способы снижения воздействия опасных факторов пожара на участников тушения пожаров объектов энергетики**

Потребность в защите участников тушения пожаров объектов энергетики от ОФП определяется степенью воздействия последних. Наиболее сложным в преодолении являются повышенная температура окружающей среды и тепловой поток. Для работы в условиях повышенных температур пожарные оснащены набором средств защиты от различных диапазонов температур (термоагрессивостойкие и теплоотражательные костюмы, теплозащитные экраны, водяные завесы). При этом следует отметить, что средства тепловой защиты в значительной степени снижают работоспособность и маневренность пожарных внутри помещений объекта энергетики, иногда в такой степени, что это может угрожать потерей ориентации и невозможностью своевременного покидания опасной зоны.

Намного чаще пожарным приходится защищаться от дыма, который представляет собой набор таких ОФП, как повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения; пониженная концентрация кислорода и снижение видимости в дыму. Воздействие первых двух факторов предотвращается применением специальной защитной (боевой) одежды, средств защиты органов дыхания и зрения. Сложнее в условиях пожара преодолеть влияние снижения видимости в дыму, которое значительно замедляет продвижение к зоне горения. Высокая плотность задымления помещений объектов энергетики обуславливается наличием в них материалов (горючих жидкостей и электроизоляции) с высокой дымообразующей способностью. Также следует отметить, что продвижение пожарных в условиях снижения видимости в дыму повышает риск воздействия сопутствующих проявлений ОФП характерных для большинства помещений объектов

энергетики, к которым относятся [17]:

- осколки, части разрушившихся зданий, сооружений, транспортных средств, технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- радиоактивные и токсичные вещества и материалы, попавшие в окружающую среду из разрушенных технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- вынос высокого напряжения на токопроводящие части технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- опасные факторы взрыва, происшедшего вследствие пожара;
- воздействие ОТВ.

Наибольшую сложность представляет сочетание нескольких ОФП. Наиболее распространенным и сложным является воздействие повышенной температуры в условиях задымления со снижением видимости в дыму. В таких условиях ограничено применение теплоотражательных костюмов из-за невозможности контроля характера изменения температуры и риска превышения защитного порога костюма. В связи с этими обстоятельствами сочетание повышенной температуры и задымления значительно замедляет или делает невозможным достижение зоны горения.

По прибытии к месту закрытого пожара чаще всего наблюдается дым, который препятствует отысканию очага пожара. Весьма часто от очага пожара (зоны горения) пожарных отделяет несколько задымленных помещений объекта энергетики, которые необходимо преодолеть прежде, чем удастся достичь помещения пожара. Основным механизмом нахождения очага пожара для подачи ОТВ является обеспечение доступа пожарных к горящему помещению через задымленные. Для этого целесообразно снизить задымление на путях продвижения пожарных к помещению или очагу пожара, а если это невозможно, то обеспечить непрерывное продвижение к горящему помещению с соблюдением мер безопасности, в том числе, электробезопасности.

На фоне всего комплекса опасных и вредных для здоровья факторов пожара основным фактором профессионального риска пожарных остается отравление дымом, что составляет от 10 до 20 % несчастных случаев при тушении пожаров [137–140], что в полной мере относится и к пожарам объектов энергетики.

Известно, что в разных комбинациях в дыму пожара присутствуют более 175 токсичных продуктов горения [141]. Состав горючей нагрузки объектов энергетики отражает общую тенденцию с превалированием характерных составляющих, также являющихся весьма токсичными. Установлено, что в зоне задымления при пожаре чаще всего в концентрациях, значительно превышающих предельно допустимые, обнаруживается монооксид углерода, диоксиды серы и азота, хлористый водород, цианистый водород, углеводороды, альдегиды и ряд органических веществ [142]. Очень серьезная и наиболее обсуждаемая опасность связана с риском отравления монооксидом углерода [140], [143]–[146]. Повсеместное применение синтетических полимерных материалов в отделочных материалах при строительстве и в промышленности, в том числе на объектах энергетики, делает состав дыма более токсичным [141], [143], [147]–[149]. Объекты энергетики не являются исключением.

Условия работы на пожаре подразумевают высокую психофизиологическую, токсическую и температурную нагрузку, что в сочетании с комбинированным воздействием токсикантов дыма в концентрациях, значительно превышающих предельно допустимые, является причиной развития профессиональных болезней, которые у пожарных практически не регистрируются [150]. Отравления на пожаре рассматриваются как возникающие несчастные случаи (травмы), которые не учитывают отдаленного во времени влияния на организм. Обилие факторов профессионального риска затрудняет изучение характера формирования профессиональных болезней у пожарных и делает необходимым поиск новых подходов к минимизации последствий токсического воздействия дыма.

Отрицательное влияние составляющих дыма на организм человека при вдыхании на пожаре достаточно широко известно. Наряду с составом токсичных веществ важное значение имеет концентрация опасных для человека веществ, которые могут вызвать поражение человека в течение нескольких минут [140], [141], [146]. Статистически каждый житель страны попадает в условия пожара в среднем один раз за сознательную жизнь и влияние дыма на него можно считать одноразовым [151]. По-другому обстоит дело с пожарными, которые вдыхают дым многократно



в течение профессиональной деятельности. Присутствующие даже в небольших количествах токсиканты дыма могут накапливаться в организме и впоследствии стать причиной развития патологических состояний, фактически профессиональных болезней, о чем свидетельствуют многолетние клинические наблюдения [152], [153].

Концентрация дыма при пожаре в помещениях объекта энергетики убывает по мере удаления от очага пожара. Поэтому для работы в зоне больших концентраций дыма для подхода к помещению или очагу пожара пожарные используют СИЗОД, которые, изолируя органы дыхания от внешней среды, обеспечивают дыхание имеющимся запасом дыхательной смеси, переносимым самим пожарным. Решение на применение и прекращение применения СИЗОД изолирующего типа принимается руководителем тушения пожара, а на боевом участке – соответствующим начальником. В процессе тушения пожара внутри зданий и сооружений объектов энергетики, как правило, при локализации пожара происходит исчерпание времени защитного действия ДАСВ. После этого пожарные их снимают и работы по тушению продолжаются без СИЗОД. Иногда ДАСВ снимают в связи с необходимостью их перезарядки или из-за повышенной трудности выполнения работы в них. Следует отметить, что характер работ по локализации пожара, когда основной задачей является предотвращение распространения пожара в пространстве путем тушения открытого пламенного горения, является наиболее интенсивным, но меньшим по времени, чем процесс от момента локализации до полного прекращения горения (дотушивание). При этом производится тушение отдельных оставшихся открытых очагов и больше времени тратится для обнаружения и ликвидации скрытого горения внутри полостей, оборудования, в слое или завалах горючих материалов в помещениях объекта энергетики. Целью этих работ является исключение любого вида горения на пожаре, в том числе тления, которое впоследствии может перерасти в открытое горение.

В процессе дотушивания выполняется ряд работ, связанных с разборкой конструкций и материалов, иногда вынос их за пределы горящего помещения или здания, тушение обнаруженных очагов. Использование изолирующих СИЗОД

затрудняет выполнение таких работ, так как они ухудшают обзор, создают повышенное сопротивление дыханию, требуют значительных энергозатрат пожарного на переноску, ограничивают возможности выполнения физической работы [154]–[156]. В связи с этим на практике применение СИЗОД изолирующего типа прекращается, как только повышается концентрация кислорода, позволяющая пожарному дышать. Такая ситуация часто возникает из-за необходимости перезарядки ДАСВ, для чего требуется доставка к месту пожара объекта энергетики дополнительных баллонов со сжатым воздухом. Руководитель тушения пожара имеет право организовать работы в СИЗОД до полной ликвидации пожара, но обычно этого не делают из-за повышения утомляемости участников тушения, дополнительного неудобства работы в СИЗОД и необходимости привлечения для тушения дополнительных сил и средств. Поэтому вдыхание дыма происходит и при дотушивании и, как правило, в течение большего времени, чем продолжительность работы в СИЗОД изолирующего типа при локализации пожара.

С другой стороны, статистически большая часть пожаров объектов энергетики тушится без применения СИЗОД. Это пожары на открытой местности, при тушении которых выделяется дым, вдыхаемый пожарными. Наличие в дымовой среде пожара на открытой территории достаточного количества кислорода для дыхания позволяет работать без СИЗОД, но не может исключить попадания в организм и накопления в нем токсикантов дыма. Состав дыма при пожарах объектов энергетики становится все более опасным и вредным для здоровья из-за применения во всех сферах деятельности человека постоянно расширяющейся гаммы материалов различного химического состава, при горении которых выделяются вещества, обладающие опасными биологическими свойствами – канцерогенными, кардиотоксическими, аллергенными, нейротоксическими, антирепродуктивными и др. [142], [157–159].

По мнению доктора *J. Locke* (США), который изучил данные о 110000 пожарных по 32 научным публикациям (2006 г.), повышение частоты раковых заболеваний у пожарных вполне закономерно не только в связи с вдыханием канцерогенов с дымом, но и попаданием их на незащищенные участки кожных покровов

[160]. Присутствующие в дыму дихлорэтан, трихлорэтан и сероуглерод обладают кардиотоксическим эффектом, то есть поражают сердечную мышцу, повышая ее чувствительность к адреналину [157]. Поскольку концентрация адреналина в крови человека в стрессовой ситуации значительно возрастает, перечисленные компоненты дыма могут способствовать развитию острой сердечной недостаточности, что в совокупности с другими факторами аналогичного действия может объяснить случаи внезапной смерти по этой причине на пожаре. Особого внимания заслуживают диоксины, научная информация о которых свидетельствует, что эти соединения являются фундаментальными факторами загрязнения биосферы, а пожары являются одним из важных источников выделения диоксинов в окружающую среду [148], [161], [162]. Диоксины признаны супер-ядами, а токсичность некоторых из них значительно превосходит воздействие цианистого калия. Особая опасность попадания диоксинов в организм человека заключается в их свойстве накапливаться в тканях (кумулятивное свойство), что со временем приводит к нарушению функций органов и систем.

Следовательно, тушение пожара объекта энергетики в современных условиях требует соблюдения определенных правил и использования специально подобранных респираторов для защиты от дыма, содержащего опасные диоксины в сочетании с другими токсикантами. Диоксины должны быть признаны в качестве профессионального фактора риска пожарных, что подтверждено многолетними клиническими исследованиями «шелеховской когорты» пожарных, получивших отравление при тушении пожара на ОАО «Иркутсккабель» в 1991 г., где горело большое количество полихлорвиниловой пленки и других полимерных материалов, в продуктах горения которых содержатся диоксины [152], [153]. Из 700 участников тушения пожара 104 в результате отравления дымом получили различные степени инвалидности. Данный случай является характерным, так как кабельная продукция является преобладающим видом горючей нагрузки объектов энергетики. Клинические наблюдения проводились более 17 лет и показали, что последствия воздействия токсикантов дыма проявляются в течение многих лет. Особая опасность диоксинов заключается в том, что, попадая в организм даже в малых количествах, они

накапливаются в разных органах и пагубно влияют на здоровье. Обнаруженные в организме пострадавших пожарных диоксины чрезвычайно медленно выводились из организма и стали для многих причиной развития болезней [152], [153]. История техногенных аварий, в ликвидации которых ведущая роль принадлежит пожарно-спасательным формированиям, свидетельствует о токсической опасности, которой подвергается личный состав вследствие выброса в окружающую среду аварийно химически опасных веществ [147], [149]. С другой стороны, почти полного исключения вдыхания дыма пожара можно достигнуть применением СИЗОД не автономного изолирующего типа, которые создают приемлемые эргономические условия работы для тушения открытых пожаров и дотушивания закрытых пожаров. Выбор СИЗОД часто основывается только на их защитных свойствах и не учитывает влияния на человека. Между тем, учет влияния СИЗОД в ряде случаев оказывается решающим для успеха применения того или иного средства. Это особенно важно в условиях, когда концентрации вредных веществ в воздухе лишь ненамного превышают предельно допустимые концентрации и не создают непосредственной угрозы здоровью человека.

СИЗОД применяются при невозможности довести содержание вредных веществ во вдыхаемом воздухе до допустимого уровня путем технических и санитарно-технических мер, в том числе с помощью средств коллективной защиты. Любое превышение концентраций по сравнению с предельно допустимыми и (или) опасность недостатка кислорода служат основанием для применения СИЗОД [163].

Рассматривая применение различных типов СИЗОД для тушения пожаров объектов энергетики следует остановиться на том, что пожарным запрещено использовать фильтрующие средства. Это связано с возможным снижением содержания кислорода и появлением в среде пожара объекта энергетики не поглощаемых фильтром опасных веществ. Причины эти весомы, однако следует отметить, что в последние годы разрешены к использованию фильтрующие самоспасатели для эвакуации людей из зоны задымления при пожарах типа ГДЗК, «Шанс» [164], а также разработаны и используются малогабаритные анализаторы воздушной среды на наличие основной гаммы опасных веществ дыма и кислорода.

Комплексное применение современных средств контроля и фильтров может позволить использовать фильтрующие СИЗОД для тушения открытых пожаров и дотушивания пожаров в зданиях и сооружениях объектов энергетики, не подвергая пожарных риску отравления продуктами горения или вдыхания очищенного от вредных веществ воздуха с пониженным содержанием кислорода. Кроме этого, имеет смысл рассмотреть применимость шланговых СИЗОД, задействованных параллельно рукавным линиям, тем более что разработаны шлангово-фильтрующие системы, в том числе работающие от сетей среднего давления. Таким образом, комплексный подход к снижению токсического воздействия дыма на пожарных включает сочетание своевременного применения средств защиты, учитывающих характер выполняемой пожарными работы.

Анализ информации об острых и отдаленных последствиях воздействия на организм человека средовых поражающих факторов пожара объекта энергетики позволяет выделить в настоящее время приоритетные направления дальнейших исследований для оптимизации защиты органов дыхания пожарных, связанных с длительным повторяющимся токсическим воздействием дыма. Комплексный подход к проблеме защиты пожарных от токсического воздействия дыма и минимизации риска развития профессиональных заболеваний предполагает систему защиты органов дыхания, зрения и кожных покровов пожарных, которая включает:

- применение до воздействия дыма фармакологической и алиментарной защиты с учетом специфики несения пожарными дежурства и частоты вызовов на пожары;
- использование СИЗОД на всех этапах тушения пожара с учетом разработки комплекса мер, позволяющих применять при дотушивании закрытых и тушении открытых пожаров средства защиты органов дыхания не изолирующего типа или технические методы изоляции органов дыхания от дыма неавтономного типа;
- тщательное проведение деконтаминационных процедур после тушения пожара;
- периодическое проведение комплексных программ реабилитации и детоксикации пожарных в зависимости от характера воздействия дыма и других ОФП, а

также на основе результатов химического мониторинга здоровья. Такой подход носит название саноцентрического и более подробно изложен в научной работе [164].

Опасность действия теплового фактора в условиях тушения пожаров рассматривается в литературе главным образом в плане риска получения ожогов или теплового удара пожарными [165–167]. В то же время накопилось достаточно данных, свидетельствующих о негативном влиянии на здоровье человека периодического воздействия нагревающего микроклимата (НМК). Установлено, что периодическое перегревание обладает канцерогенным, аллергенным и кардиотоксическим эффектами и может быть причиной возникновения и развития тяжелых хронических заболеваний [137–141]. Более того, периодическое тепловое воздействие влияет на репродуктивную функцию человека [137], что придает обозначенной проблеме не только медицинское, но и социальное значение [142].

Эргономическая и физическая нагрузка на личный состав боевых подразделений, обусловленная необходимостью применения СИЗ и тяжелым физическим трудом, сама по себе является причиной накопления тепла в организме, что усугубляет воздействие внешней температуры и снижает работоспособность человека [168]. На основании проведенного анкетирования (опрошено около 400 человек) по теплоощущениям пожарных в ППО в различных регионах России установлено, что 60–70 % газодымозащитников в процессе ведения боевых действий периодически ощущают, что им «жарко» или «очень жарко», что является признаком нарушения теплового комфорта и в совокупности с результатами экспериментальных исследований позволяет говорить о периодическом перегревании личного состава газодымозащитной службы [169].

Приведенные факты свидетельствуют об актуальности проблемы периодического теплового воздействия на пожарных в плане изучения отдаленных последствий такого воздействия на жизнедеятельность пожарных [170], [171].

На вооружении противопожарной службы имеется ряд различных типов специальной защитной одежды, в том числе и от воздействия высоких температур, например, в России – это ТК-800, ТОК-200, специальная защитная одежда изоли-

рующего типа (СЗО ИТ). Однако они используются гораздо реже, чем обычная защитная одежда пожарных, в которой приходится работать. О причинах этого говорилось выше. Использование средств индивидуальной защиты пожарных в условиях высоких температур окружающей среды и повышенной влажности воздуха может привести к быстрому перегреванию организма пожарного с последующим снижением работоспособности, а иногда и к тепловому удару с потерей сознания.

Следовательно, организм часто подвергается тепловой нагрузке – внешней за счет высокой температуры окружающей среды и внутренней – за счет метаболической теплопродукции.

Повысить тепловую устойчивость организма пожарного можно двумя путями:

- специальной тренировкой в теплокамере («тепловая тренировка»);
- применением теплопротекторов – веществ, ослабляющих негативное влияние повышенного теплового воздействия и тяжелой физической работы на организм пожарного.

Первый путь нашел отражение в методических указаниях по организации и проведению занятий с личным составом газодымозащитной службы пожарной охраны. Второй – предусматривает различные способы тренировки гипоксией, физическими упражнениями, применение биотических элементов, фармакологических и парафармакологических средств, антиокислителей, успешно применяющихся для защиты в других профессиональных группах, так же подвергающихся вредным и опасным факторам среды как пожарные [168], [172].

Проблема снижения тепловой нагрузки пожарных, использующих защитную одежду при выполнении боевых задач, решается за рубежом, в частности, с использованием различных охлаждающих приспособлений.

Представляют интерес разработки в этой области, проводившиеся в Японии токийским департаментом пожарной охраны и рядом японских фирм [173].

Поставленная задача состояла в создании такой охлаждаемой одежды пожарного, которая была бы максимально дешевой, легкой, с достаточно большой по-

верхностью охлаждения, удобной и надежной в эксплуатации. Система охлаждения, предложенная разработчиками, выполняется в виде четырех съемных пластин, закрепляемых в карманах на внутренней стороне пожарной куртки. Пластины изготавливаются из полимерного материала, хорошо поглощающего воду. После насыщения водой их замораживают и хранят в холодильнике, используя по мере необходимости. Для оценки нового вида защитной одежды были проведены сравнительные испытания на реальном фоне интенсивного пожара. 15 пожарных-испытателей использовали охлаждаемую защитную одежду и обычную в качестве контрольной. В целом предлагаемая система охлаждения оценивается положительно. Важную роль она может сыграть на психологическом уровне – в уменьшении чувства усталости и перегрева при выполнении пожарными своих боевых задач. Отмечается необходимость при использовании охлаждаемых элементов предотвращать угрозу переохлаждения у пожарного областей сердца и почек. Кроме этого способа снижения тепловой нагрузки пожарных существуют и другие.

Проведены исследования воздействия витаминно-минерального напитка на физиологическое состояние организма пожарных в условиях нагревающегося микроклимата [174]. При исследовании «теплопротекторного» действия витаминно-минерального напитка при температуре окружающей среды  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  найдено достоверное снижение прироста частоты пульса у испытуемых в среднем на  $17\pm 4$  уд/мин и выявлена тенденция снижения влагопотерь на  $0,2\pm 0,1$  кг, что говорит о его положительном влиянии на степень функциональных сдвигов в организме испытуемых. Прием витаминно-минерального напитка не привел к достоверному снижению прироста температуры. Артериальное давление, насыщение гемоглобина артериальной крови кислородом, сила мышц кисти и субъективная оценка испытуемыми своего состояния не изменялись как при  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , так и при  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При температуре окружающей среды  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  достоверная разница по показателям не найдена, однако имеется тенденция к их положительному изменению.

В результате приема витаминно-минерального напитка при выполнении испытуемыми работы средней тяжести до отказа показатели функционального состо-



яния не превышали физиологически допустимых пределов. Такой эффект от использования напитка достигается при увеличении в два раза составляющих его солевых компонентов. Вероятно, это связано с тем, что в условиях высоких внешних температур (более 35–36 °С) теплоотдача происходит исключительно за счет охлаждающего действия испарения влаги с поверхности тела, вместе с которой, например, теряется хлорид натрия [168]. Продолжительность действия напитка примерно совпадает со средним временем тушения пожара.

Проведенные исследования показали, что во время ведения боевых действий по тушению пожара одним из наиболее доступных способов предупреждения перегрева организма является прием витаминно-минерального напитка, который обладает теплопротекторной эффективностью.

Установлено, что его применение повышает тепловую устойчивость, способствует нормализации кислородного снабжения организма, обеспечивает поддержание работоспособности газодымозащитника в условиях, ведущих к его перегреванию, это позволяет рекомендовать использование витаминно-минерального напитка в пожарной практике.

Готовить его необходимо перед заступлением на суточное дежурство (для пополнения запаса – во время дежурства), а вывозить в кабине пожарного автомобиля из расчета 250 мл на одного человека. Употреблять следует при заступлении на дежурство, во время движения к месту вызова и по необходимости при перегревании. При затяжных пожарах или ведении боевых действий в сложных условиях можно повторить прием напитка в перерывах между работой.

Витаминно-минеральный напиток («теплопротектор») имеет следующий компонентный состав (на 250 мл воды): NaCl – 34,2 ммоль/л; Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> – 2,68 ммоль/л; поливитаминный препарат «Аэровит», инструкция к которому одобрена Фармакологическим комитетом МЗ СССР и утверждена 19 июня 1987 года.

Сравнивая эффект витаминно-минерального напитка с эффектом от использования рассмотренной выше охлаждаемой защитной одежды пожарного [173] можно отметить, что использование первого предпочтительнее, так как, например,

он способен снизить частоту пульса во время работы на 5–10 уд./мин., а охлаждающие элементы лишь на 7–8 уд./мин. Кроме этого потребуется создать порядок обеспечения пожарного охлаждающими элементами, их хранения, замены и доставки, что представляет большие трудности по сравнению с приготовлением и употреблением напитка [174].

Предложенный комплекс организационно-технических методов защиты участников тушения пожаров объектов энергетики направлен в большей степени на сохранение здоровья и работоспособности пожарных и не может в полной мере заменить средства защиты от воздействия ОФП.

### **3.2 Исследование возможности улучшения основных параметров средств защиты участников тушения пожаров объектов энергетики**

Для защиты пожарных от токсичной среды пожаров объектов энергетики применяются СИЗОД. Для защиты органов дыхания от ОФП профессиональные пожарные используют два вида дыхательных аппаратов – резервуарные дыхательные аппараты (дыхательные аппараты на сжатом воздухе – ДАСВ) и регенеративные дыхательные аппараты со сжатым кислородом – ДАСК, имеющие также название кислородно-изолирующие противогазы. Применение других видов средств защиты органов дыхания ограничено их техническими особенностями, что либо не позволяет обеспечить безопасность пожарных в непригодной для дыхания среде, либо привести средство в готовность к применению в срок, достаточный для своевременного тушения пожара. За последние три десятилетия в России наметилась тенденция к более широкому применению аппаратов сжатого воздуха [163]. Это обусловлено комфортными условиями дыхания в них по сравнению с кислородными аппаратами, а также дешевизной эксплуатации, так как не требуется создание запаса кислорода и химического поглотителя углекислого газа и оборудования для их хранения и снаряжения ими аппаратов.

Дыхательный аппарат, как и любое средство индивидуальной защиты, выполняя основную защитную функцию, вместе с тем ухудшает условия дыхания человека и снижает производительность труда, забирая часть полезной энергии для его переноски, ограничивая свободу движений, обзора. К этим неблагоприятным факторам добавляется психофизиологический дискомфорт, в некоторых случаях превосходящий все физиологические воздействия [154].

История развития приборов для нахождения человека в непригодной для дыхания среде насчитывает более полутора веков. Практически столько же человек пытается привести условия работы в дыхательном аппарате к естественному дыханию, уменьшить все виды нежелательных воздействий на работающего. Как показывают исследования, к самым неблагоприятным факторам, по оценке самих пожарных, относятся недостаточное время защитного действия и значительный вес аппарата [175]. Только ношение одного аппарата нарушает точность и уверенность движений на 20–25 % [176]. Использование дыхательных аппаратов снижает время выполнения основных видов работ в 1,5–3 раза [177].

Оценка влияния средств индивидуальной защиты на человека проводилась комплексным методом оценки эргономических параметров дыхательных аппаратов, который заключается в дополнительной нагрузке, получаемой человеком при работе в дыхательном аппарате за счет указанных факторов по сравнению с условиями работы без него в комфортной среде [178]. На основе этой методики создана программа расчета эргономических показателей дыхательных аппаратов, с помощью которой были произведены расчеты параметров современных дыхательных аппаратов, позволившие провести сравнительный анализ воздействия на человека при работе (рисунок 3.1).

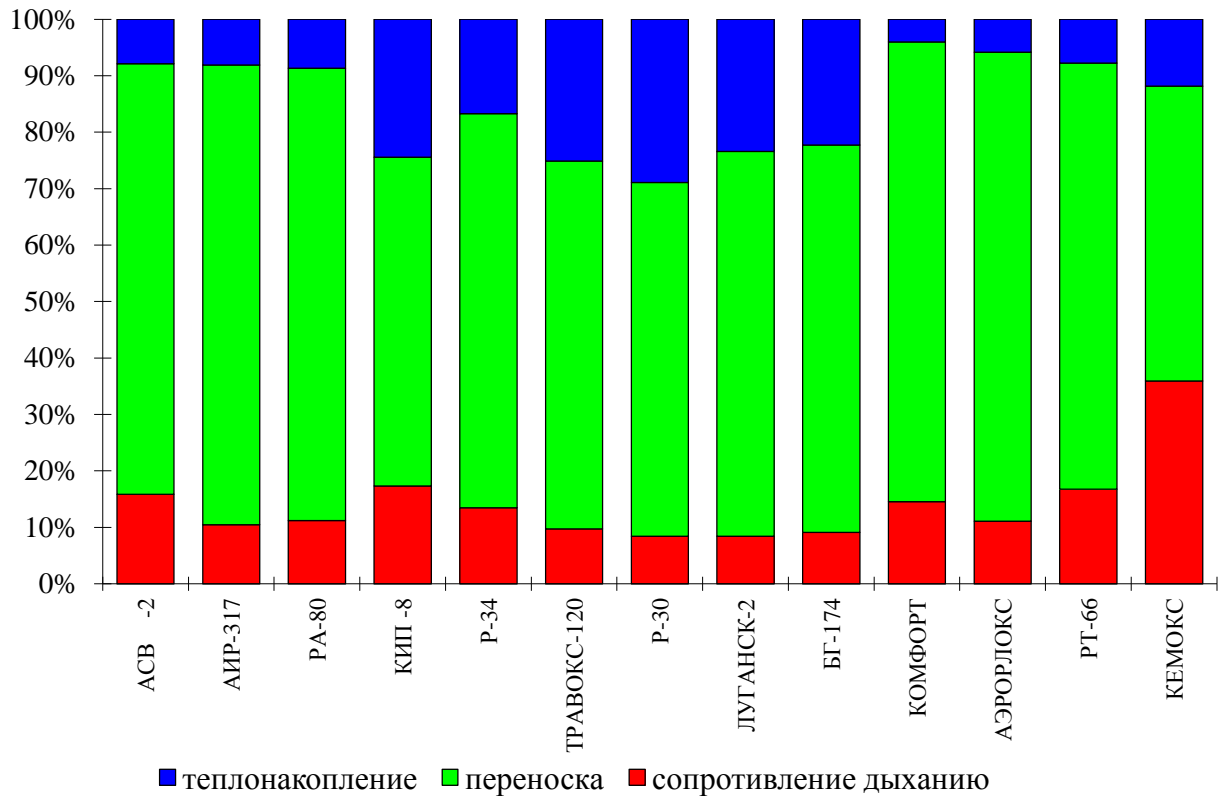


Рисунок 3.1 – Воздействие некоторых типов и моделей дыхательных аппаратов на человека по видам нагрузки

Фактором, наиболее сильно снижающим работоспособность пожарного, является значительный вес аппарата. Особенно это проявляется в аппаратах сжатого воздуха. Вторыми по величине являются неблагоприятные микроклиматические условия дыхания, и этот фактор заметен при использовании кислородных аппаратов. Сопротивление дыханию не оказывает значительного воздействия [179], [180].

Сравнение показывает, что уровень энергозатрат на дыхательный аппарат составляет 30–40 % от общих усилий пожарного на боевую работу, а переноска отнимает 46–80 % всех затрат на использование аппарата или 18–35 % от общих энергозатрат пожарного [154], [179], [181].

Вес аппарата зависит от времени защитного действия (ВЗД) и поэтому вступает с ним в противоречие. Показателем, оценивающим соотношение времени защитного действия аппарата к его массе, является удельное время защитного действия (УВЗД). Измеряется оно обычно в минутах на килограмм и весьма наглядно характеризует качества аппарата и потенциальные возможности его применения. Для возможности оценки влияния аппарата с учетом удельного времени защитного действия в методику

и программу расчета введены удельные показатели времени защитного действия, показывающие влияние как массы, так и всего аппарата (рисунок 3.2).

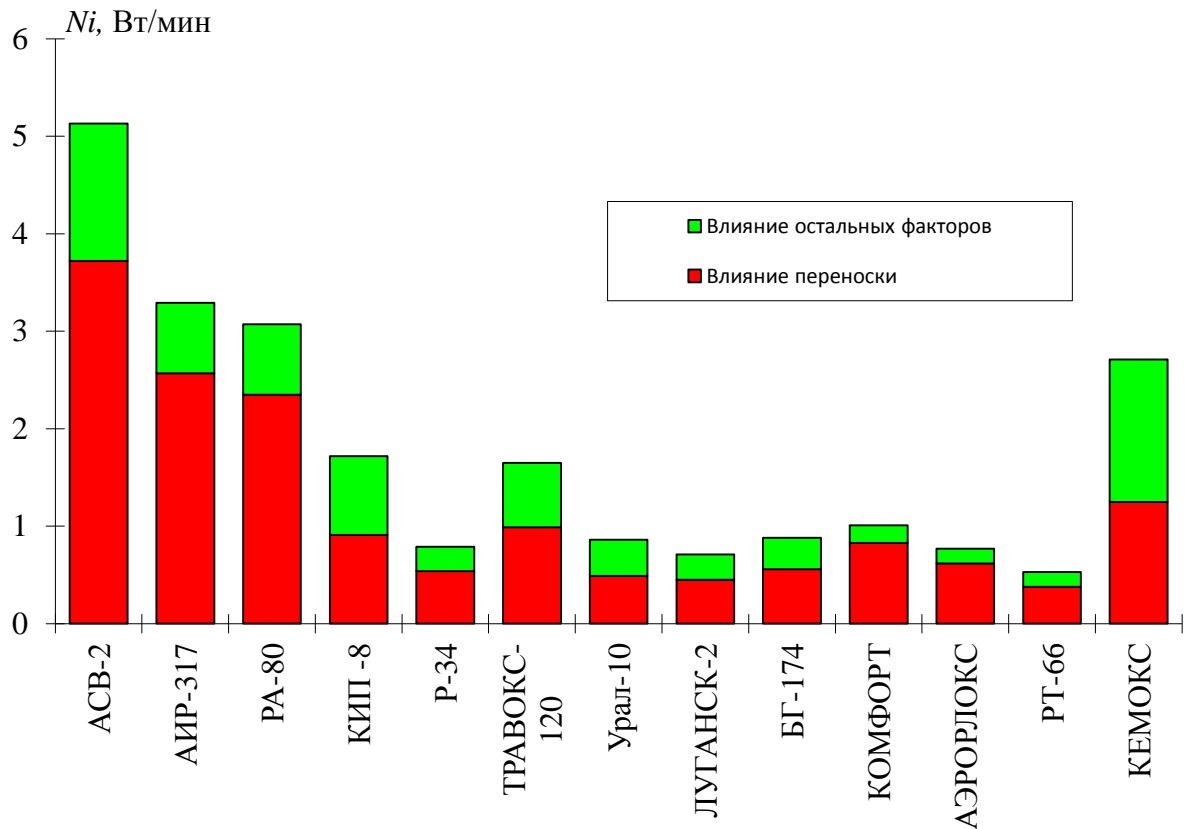


Рисунок 3.2 – Удельный комплексный показатель по ВЗД ( $N_i$ ) для различных типов и моделей аппаратов

Удельное время защитного действия интересно и тем, что с его помощью можно сравнивать разные по классу аппараты, оценивая уровень внедрения в устройство аппарата новых конструкторско-технических решений, прогрессивных материалов и технологий.

Свойства современных типов автономных дыхательных аппаратов позволяют на основании проведенного анализа сделать вывод, что для тушения пожаров наиболее пригодны ДАСК и ДАСВ. Применение аппаратов на химически связанном и жидком кислороде нецелесообразно из-за отсутствия индикатора расхода ресурса, невозможности длительных перерывов в работе, длительной подготовки к использованию [137], [156], [176], [179], [182–189], (таблица 3.1), а также по экономическим и эргономическим соображениям.

Таблица 3.1 – Сравнительная характеристика типов автономных аппаратов

Параметры	Регенеративные ДА со сжатым кислородом	Регенеративные ДА с химически связанным кислородом	Регенеративные ДА с жидким кислородом	Резервуарные ДА
Вес, кг	8 ÷ 14	6 ÷ 11	11 ÷ 15	14 ÷ 22
Время защитного действия, мин.	120 ÷ 300	20 ÷ 300	180 ÷ 240	40 ÷ 70
Удельное время защитного действия, мин.	10 ÷ 21	10 ÷ 29	13 ÷ 18	3 ÷ 5
Сопротивление дыханию на вдохе, Па на выдохе, Па	100 200	150 420	180 270	0 200
Температура вдыхаемого воздуха, °С	40 ÷ 50	30 ÷ 40	20 ÷ 30	20 ÷ 30
Возможность длительных перерывов в работе	есть	нет	нет	есть
Индикатор расхода	есть	нет	нет	есть
Готовность к использованию, мин.	1	2	10	1

В то же время, как показывает практика, в области организации работ по тушению пожаров объектов энергетики в непригодной для дыхания среде не в полной мере решены вопросы применения ДАСВ для пожарных и аварийно-спасательных подразделений. Основным их недостатком является малое время защитного действия при достаточно большой массе. Большинство моделей имеют время защитного действия в пределах 1 ч. при массе 12÷16 кг, в то время как кислородные аппараты превышают это соотношение более чем в два раза. Кроме этого, снижение времени защитного действия в ДАСВ с постоянным подпором воздуха в подмасочном пространстве происходит из-за стравливания не использованной для дыхания части воздуха через клапан выдоха маски, так как величина его срабатывания находится в диапазоне подпора. Это приводит к необходимости смены, работающей в непригодной для дыхания среде, и влияет на непрерывность выполнения работ по тушению пожаров.

Дополнительное усложнение работ по тушению пожаров объектов энергетики происходит при угрозе добавления к ОФП химических или радиационных воздействий. В этом случае возникает необходимость применения СЗО ИТ [159]. Работа в СЗО ИТ

имеет характерные особенности, связанные с достаточно длительным (до 5 мин.) временем надевания костюмов, скоростью перемещения и выполнения задач, эргономики оперативной работы, что в совокупности с дополнительными факторами влияет на показатели работы в дыхательном аппарате, удаленности поста безопасности от проводимых работ, специфическими условиями и сложностью работы. Надевание средств защиты и включение в дыхательный аппарат производятся по выезду из части или на организованном посту безопасности. Кроме того, после завершения работ в зоне химического либо радиационного заражения должно быть предусмотрено наличие необходимого запаса воздуха в баллонах дыхательных аппаратов для прохождения дегазационных мероприятий и санитарной обработки [190].

Пожарные подразделения во время передвижения до места работ могут преодолевать значительные расстояния, при этом используются автомобили химической разведки или автоцистерны. Такие передвижения также существенно влияют на расход запаса воздуха. Так, при движении в одну сторону может израсходоваться до 30 % носимого запаса (рисунок 3.3).

В настоящее время исследования влияния термоагрессивостойких средств защиты на оперативные показатели выполнения поставленных задач, а также на длительность работы в СИЗОД отсутствуют. Для решения этой задачи в настоящей работе проведены исследования, позволяющие количественно оценить влияние меняющихся условий работы на время защитной работы в изделиях при установленных воздействующих внешних факторах, а также качественно оценить их влияние на показатели работоспособности человека, экипированного в СЗО ИТ, при выполнении им оперативно-тактических действий по тушению пожара и проведению аварийно-спасательных работ.

Результаты экспериментов подтвердили, что тепло- и влажностные (процессы) воздействия рабочей среды на теплозащитные свойства защитных пакетов в процессе эксплуатации приводят к значительному снижению защитных показателей изделий. Увеличение влажности в ткани приводит к повышению теплопроводности защитных материалов для пожарных, что снижает теплозащитные характеристики костюма и соответственно время наступления болевой критической температуры, а также может привести к тепловому удару.

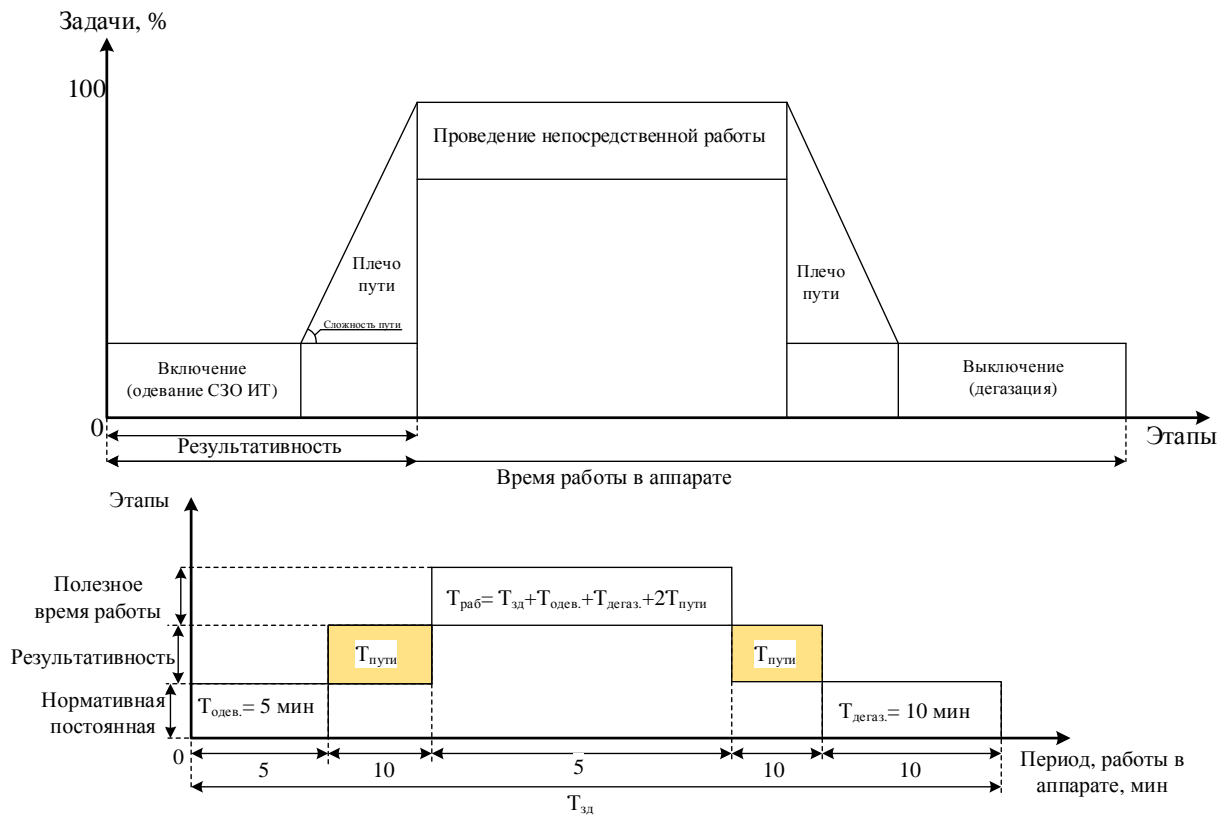


Рисунок 3.3 – Структурная схема эффективности действий личного состава пожарных подразделений в зависимости от видов (типов) используемой спец-одежды и технических характеристик эксплуатируемых дыхательных аппаратов

Поэтому при работе в изолирующей защитной одежде в условиях повышенных температур необходимо соблюдать специальные требования по длительности работы в зависимости от условий труда. Полученные данные по допустимым срокам непрерывной продолжительности работы в ходе проведенных исследований представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Данные по допустимым срокам непрерывной продолжительности работы в термоагрессивостойких костюмах

Средство индивидуальной защиты	Физическая нагрузка	Продолжительность работы при $T$ окружающей среды, °С, мин					
		0–19	20–24	25–29	30–40	41–99	100–150
ТАСК, ТАСК-М	Легкая	Не более 180	120	90	60	–	–
	Средняя	120	60	35	25	–	–
	Тяжелая	60	35	25	15	12	3
ТАСК-Т, ТАСК-МТ	Тяжелая	60	40	30	20	16	6



Из приведенных исследований видно, что некоторые виды работ возможно проводить более длительное время, чем фактически ограниченное работой в ДАСВ.

Чтобы проанализировать время работы в СЗО ИТ, при расчете общей времени работы в дыхательном аппарате дополнительно к времени возврата из непригодной для дыхания среды обязательно должны учитываться период передвижения до пункта прохождения дегазации и время ее прохождения.

При определении времени и потерь давления на проведение дегазационной обработки необходимо руководствоваться разработанными методиками по специальной обработке [176].

Для определения потери давления, необходимого на путь, на основе расчетов и результатов проведенных испытаний разработан график (рисунок 3.4).

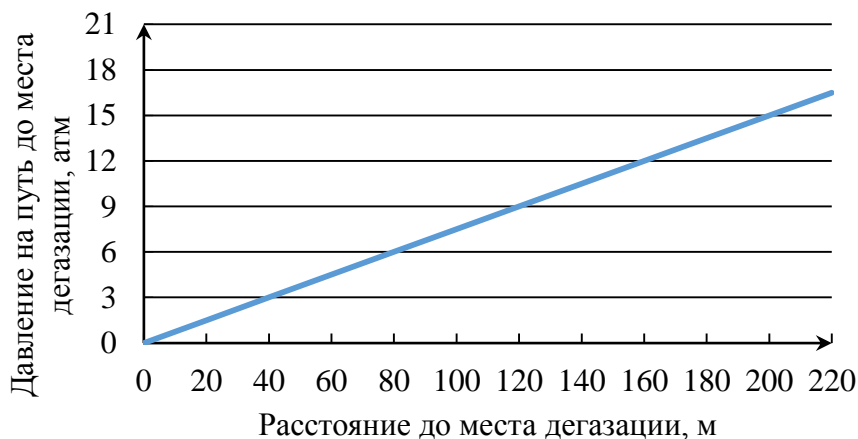


Рисунок 3.4 – Расчетные показатели необходимого давления в СИЗОД для прохождения пути к пункту дегазации при легочной вентиляции  $V = 35 \text{ дм}^3/\text{мин}$

При анализе времени свободного развития пожара и времени сосредоточения подразделений по повышенному рангу установлено, что подразделения с повышенным номером прибытия перекрывают требуемые позиции по тушению пожара с длительной задержкой от момента подачи первых стволов на тушение.

Это обстоятельство вынуждает руководителя тушения пожара проводить более частую смену подразделений из-за ограничений, связанных с тактическим потенциалом СИЗОД, состоящих на вооружении пожарно-спасательных подразделений.

Поэтому для экономии воздуха в баллонах и увеличения времени работы необходимы решения, позволяющие в зависимости от вероятной обстановки увеличивать время проведения работы.

К таким решениям может относиться использование костюма с конструкцией, позволяющей осуществить возможность подключения (и отключения) дыхательных аппаратов к внешнему автономному источнику сжатого воздуха без разгерметизации наружного скафандра, использование двухбаллонных ДАСВ, а также баллонов увеличенного объема и давления до 450 атм.

Пользуясь данными рисунка 3.5, можно выбрать группу наиболее подходящих в конкретных случаях изолирующих дыхательных аппаратов. При этом необходимо учесть предполагаемую продолжительность работы в СИЗОД и условия ее выполнения, а также подготовленность привлекаемого к ликвидации аварии персонала, в том числе и физическую подготовку.

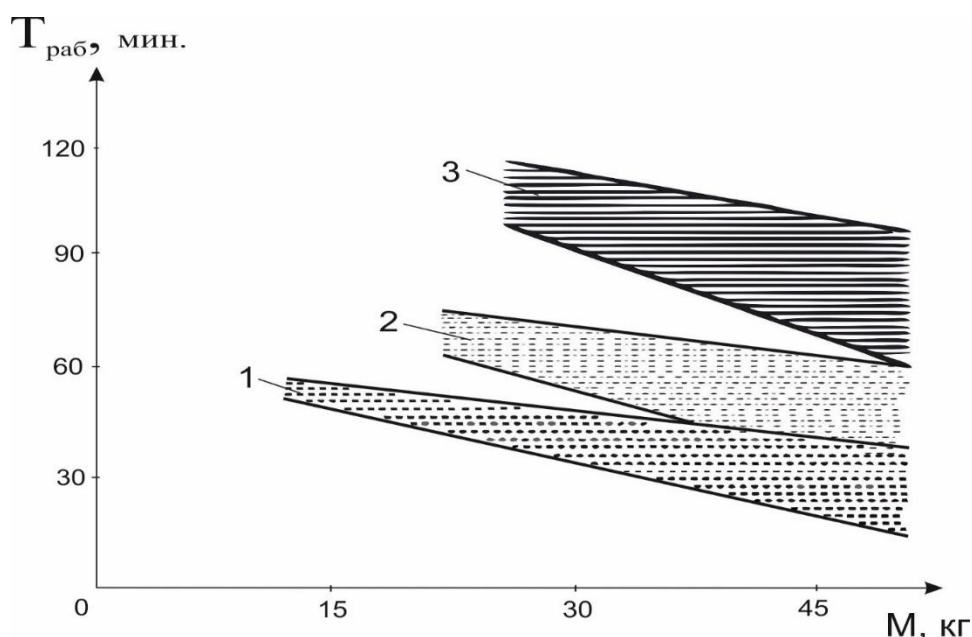


Рисунок 3.5 Условное время проведения работ с средней физической нагрузкой и объемом легочной вентиляции более  $35 \text{ дм}^3/\text{мин}$  в изолирующих костюмах в зависимости от общей массы эксплуатируемых СИЗ и ДАСВ со следующими параметрами:

- 1 – один баллон объемом  $6,8 \text{ л}$  и рабочим давлением  $300 \text{ кгс}\cdot\text{см}^{-2}$ ,
- 2 – один баллон объемом  $6,8 \text{ л}$  и рабочим давлением  $450 \text{ кгс}\cdot\text{см}^{-2}$ ,
- 3 – два баллона объемом  $6,8 \text{ л}$  и рабочим давлением  $300 \text{ кгс}\cdot\text{см}^{-2}$

Результаты исследований времени работы звена в СЗО ИТ и технических возможностей пожарно-технического вооружения при различных условиях работы могут быть учтены при организации тушения пожара на объектах энергетики в условиях воздействия химически- и радиационно опасных сред.

Для своевременных действий по локализации пожаров и ликвидации аварий на объектах энергетики важны вопросы планирования необходимых сил и средств. Результаты проведенных экспериментов с использованием пожарными СЗО ИТ позволяют утверждать, что для эффективного управления силами и средствами при организации работ по тушению пожаров требуется дополнительный резерв звеньев ГДЗС, что обусловлено специфическими условиями работы на объектах энергетики, связанными с необходимостью обеспечения непрерывной работы по локализации и ликвидации пожара [70].

Как указывалось, время защитного действия средств защиты тела человека от воздействия ОФП превышает время тушения, при том, что в средствах защиты органов дыхания имеется недостаток ВЗД.

Таким образом, недостаточный баланс между временем защитного действия СИЗОД и потребностью нахождения в непригодной для дыхания среде при тушении пожаров, на фоне эргономики СИЗОД является одной из проблем в части непрерывного и своевременного тушения пожаров объектов энергетики. Способами его повышения могут быть изыскание новых способов создания искусственной атмосферы для дыхания, либо увеличение удельного времени защитного действия, которое может быть достигнуто за счет увеличения запаса дыхательной смеси или более экономного расходования дыхательной смеси.

Одним из способов создания искусственной атмосферы для дыхания является химический способ, основанный на получении пригодной для дыхания смеси из химических соединений. Известные способы получения кислорода из жидкого или химически связанного состояния пригодны для регенеративных дыхательных аппаратов, так как выделяют кислород. Дальнейшим развитием данного направления получения дыхательной смеси может стать получение дыхательной смеси полного состава из химических соединений.

Известен способ получения дыхательной смеси путем термического или термодаталитического разложения закиси азота ( $N_2O$ ) на кислород ( $O_2$ ) и азот ( $N_2$ ) в соотношении, пригодном для дыхания [191], [192]. Метод разложения (термический или термодаталитический) выбирается в зависимости от эргономики и энергетики устройств, реализующих данный способ. С целью инициирования процесса разложения закиси азота при термодаталитическом способе датализатор реактора нагревается до температуры начала реакции. В дальнейшем, так как реакция экзотермическая, процесс регулируется подачей закиси азота. Контроль нагрева датализатора при подготовке к работе и в ее процессе осуществляется автоматически. При реализации термического способа температура реакции достигается и поддерживается за счет внешнего источника энергии.

Получение дыхательной смеси из закиси азота происходит по следующей схеме. Газообразная закись азота через регулятор поступает в даталитический пакет реактора, где происходит разложение закиси азота на кислород и азот:



Запас защитной способности контролируется по наличию закиси азота. Перерывы в работе осуществляются прекращением подачи закиси азота в реактор, причем температура реактора может поддерживаться рабочей сколь угодно долго и ограничиться лишь возможным сроком хранения закиси азота.

Недостатком данного способа является то, что получаемая при разложении закиси азота дыхательная смесь по газовому составу отличается от атмосферного воздуха, а также требуется очистка от попутных продуктов реакции разложения (окислов азота:  $NO$  и  $N_2O_3$ ). При разложении закиси азота на кислород и азот последние образуют дыхательную смесь в соотношении 1:2 соответственно, в то время как атмосферный воздух на уровне моря, являющийся для человека оптимальным, состоит из 21 % кислорода, 78 % азота и 1 % других веществ. При этом следует отметить, что такое соотношение дыхательной смеси более предпочтительнее и эргономичнее, чем состав дыхательной смеси в регенеративных дыхательных аппаратах на сжатом кислороде, где содержание кислорода доходит до 80 %.

Увеличение удельного времени защитного действия дыхательных аппаратов возможно двумя способами:

1) облегчением конструкции аппарата. Наибольший результат дает замена самой тяжелой части (резервуара для сжатого газа) на более легкую. Анализ технических характеристик показывает [188], [193], что вес баллона в регенеративном аппарате составляет до 30 % от общего веса, в аппарате сжатого воздуха – около 70 %.

2) экономным использованием ресурса аппарата. Увеличения времени защитного действия резервуарных аппаратов добиваются повышением рабочего давления в баллонах, которое ограничено пределом прочности и массой баллона.

Так, с начала 1990-х годов прошлого столетия широко стали применяться аппараты с рабочим давлением 300 атм. В настоящее время ведутся исследования по применению давления 450 атм. Запас сжатого газа хранится в баллонах цилиндрической формы. Конструкция баллонов определяется стандартами (например, ГОСТ 949-73 [194]) и представляет собой заготовку из горячекатанной трубы с закатанным в нагретом состоянии и загерметизированным сваркой днищем с одной стороны и днищем с горловиной с другой стороны. При этом толщина стенки к центру днищ плавно увеличивается до 3–4 толщин стенки трубы (заготовки).

Однако существующие конструкции газовых баллонов высокого давления не обеспечивают достаточной эксплуатационной надежности (прочности) и длительного срока службы, что связано с их определенными конструктивными особенностями. Наименее надежными точками конструкции таких баллонов [194] являются зоны перехода цилиндрической части баллона в сферу (зона краевого эффекта) и зоны герметизации дна сваркой. При увеличении рабочего давления в последнем указанные недостатки возрастают пропорционально [195].

Наиболее опасной зоной, снижающей эксплуатационную надежность и срок службы баллона, является зона краевого эффекта. Суть явления заключается в том, что в зоне перехода цилиндрической части баллона в сферическую возникает скачок напряжений, превышающих напряжения в цилиндрической части баллона на 40 %, что снижает эксплуатационную надежность и срок службы баллона.

Важной технической характеристикой баллона является удельный запас воздуха (отношение объема сжатого в баллоне газа к его массе). Данный показатель выше у баллонов сферической формы. При существующем в современных цилиндрических баллонах удельном запасе порядка 300 л/кг массы баллона, сферические баллоны имеют это соотношение не менее 360 л/кг, то есть на 20 % больше при одинаковых диаметрах баллонов.

Применение в аквалангах и дыхательных аппаратах сферических баллонов ограничено тем, что при равных с цилиндрическим объемах, сферический баллон имеет больший диаметр, что значительно увеличивает толщину акваланга (аппарата) и смещает его центр массы от центра массы человека, что создает значительное затруднение при работе. В то же время, важным преимуществом сферических баллонов является равномерное распределение внутренних напряжений материала стенок под воздействием давления газа изнутри, что позволяет снижать толщину стенок и массу баллона в целом. Кроме этого, разрыв тонкостенного резервуара из-за превышения внутреннего давления не приводит к образованию осколков, что снижает опасность хранения и транспортировки сжатого газа.

Целью рассматриваемого изобретения [195] являлось создание устройства для хранения сжатого газа с более высокими эргономическими характеристиками при меньшей материалоемкости и, следовательно, массе. При этом снижается опасность поражения находящихся вблизи баллона людей в случае его разрушения при превышении внутреннего давления предела прочности баллона.

Указанный технический результат достигается тем, что сжатый газ хранится в тонкостенных сферических баллонах, соединенных последовательно друг с другом на одной оси, и представляющих собой единое неразъемное изделие (гирлянду), при том, что количество баллонов не ограничено. Соединение частей баллонов и баллонов в гирлянду производится без соединительной арматуры, например, с помощью кольцевого сварного шва. Сферические баллоны соединяются последовательно друг с другом с условием, что соседние баллоны будут соединены каналом. В одном из крайних баллонов со стороны, противоположной от места соединения с другим баллоном, выполняется горловина с внутренней резьбой для

закачки и выпуска газа. Количество сферических баллонов в гирлянде технически не ограничено, их наращивание производится последовательно.

Способ хранения сжатого газа в сферических баллонах высокого давления (от 100 кгс/см<sup>2</sup> и выше), расположенных последовательно друг за другом на одной оси, позволяет увеличивать запас сжатого газа без увеличения массы и толщины баллона или уменьшить массу баллона при равном запасе сжатого газа, что приводит к улучшению эргономических параметров дыхательного аппарата в целом [195]. Эффект от применения такого способа хранения сжатого газа может быть получен заменой вида баллона, однако гирлянда сферических баллонов позволяет оптимизировать порядок использования изолирующих дыхательных аппаратов сжатого воздуха.

При тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ, когда время их ликвидации превышает время защитного действия дыхательных аппаратов со сжатым воздухом, необходимо быстрое восстановление работоспособности дыхательных аппаратов путем замены баллонов со сжатым воздухом для возможности продолжения работы в непригодной для дыхания среде. При затяжных пожарах, ликвидации последствий техногенных аварий и террористических актов, такое переснаряжение требуется многократно.

Известно устройство дыхательного аппарата, содержащего баллоны со сжатым воздухом, узлы крепления баллонов к подвесной системе (раме с ремнями) и воздухопроводной системе (как правило, к редуктору, закрепленному на раме) аппарата. Воздуховодная система смонтирована на раме, которая является базовой частью дыхательного аппарата, в то время как сменной частью, имеющей не менее двух соединительных узлов (с рамой и редуктором воздухопроводной системы), являются баллоны для сжатого воздуха [196].

Недостатком технического решения при замене резервуаров пользователем является необходимость выполнения следующих операций: снятие маски с головы (выключение из аппарата); снятие аппарата с наспинного положения; его укладка на горизонтальную поверхность; отсоединение порожних баллонов от воздухопроводной и подвесной систем аппарата (минимум два соединения); извлечение порожних

баллонов; установка наполненных баллонов; присоединение наполненных баллонов к воздухопроводной и подвесной системам; надевание аппарата в наспинное положение, что требует затрат времени.

Важным является уменьшение времени восстановления работоспособности дыхательного аппарата путем смены баллонов со сжатым воздухом в условиях ограниченного времени, в том числе, в исключительных случаях, в непригодной для дыхания среде.

Техническим результатом должно явиться сокращение числа операций при смене баллонов со сжатым воздухом, который достигается тем, что сменной частью дыхательного аппарата становятся баллоны с подвесной системой, а базовой – воздухопроводная система, в отличие от прототипа, где редуктор и другие детали воздухопроводной системы закреплены на раме. Местом соединения сменной и базовой частей остаются вентили баллонов и редуктор воздухопроводной системы.

В предлагаемом способе для смены баллонов достаточно отсоединить от них воздухопроводную систему при нахождении дыхательного аппарата на теле человека в рабочем положении, снять порожние баллоны, надеть наполненные и присоединить воздухопроводную систему к ним.

При этом отпадает необходимость следующих операций:

- открепление баллонов от подвесной системы;
- укладка дыхательного аппарата на горизонтальную поверхность;
- снятие порожних баллонов и замена наполненными;
- прикрепление баллонов к подвесной системе.

Кроме этого, за счет уменьшения числа операций по переснаряжению и при достаточном навыке смены баллонов возможно осуществление их смены без выключения из аппарата (снятия маски с головы) за счет задержки дыхания на вдохе. В данном случае, для смены баллонов достаточно при нахождении дыхательного аппарата на теле человека в рабочем положении отсоединить от них воздухопроводную систему, присоединить воздухопроводную систему к наполненным баллонам и открыть их вентиль, что обеспечит подачу воздуха для дыхания. После этого необ-



ходимо снять порожние баллоны и надеть баллоны с присоединенной воздухопроводной системой. Такая последовательность операций дополнительно увеличивает эффект от применения предлагаемого способа за счет исключения операций снятия маски с головы и надевания ее.

Используемый в настоящее время способ компоновки дыхательного аппарата с открытой схемой дыхания, предусматривающий смену баллонов сжатого воздуха, заключается в том, что подвесная система с ремнями для размещения дыхательного аппарата на теле человека и воздухопроводная система, подающая воздух из резервуаров в легкие человека, смонтированы на раме, которая является базовой частью дыхательного аппарата, в то время как сменной частью, имеющей не менее двух соединительных узлов (с рамой и воздухопроводной системой), являются баллоны для сжатого воздуха. Предлагаемый способ отличается тем, что сменной частью дыхательного аппарата являются подвесная система с ремнями для размещения дыхательного аппарата на теле человека и баллонами со сжатым воздухом, при этом предусматривается возможность соединения пользователем воздухопроводной системы с баллонами со сжатым воздухом при размещении дыхательного аппарата на его теле в рабочем положении [197].

В связи с этим была сделана попытка разработки дыхательного аппарата со значительно увеличенным временем защитного действия. В настоящее время изготовлена и прошла сертификацию в системе аварийно-спасательных служб МЧС России модель дыхательного аппарата ИВА-Р20 со временем защитного действия 1,5 и 2 ч с массой до 12 и 16 кг соответственно [198].

Запас воздуха в таком аппарате хранится в кассете из тонкостенных сферических баллонов, соединенных между собой. Кассета баллонов помещается в корпус аналогичный по форме и габаритам корпусу регенеративных аппаратов на сжатом кислороде двухчасового времени защитного действия типа КИП-8. Кроме того, учтена необходимость совершенствования технических решений вследствие необходимости оснащения индивидуальным аппаратом каждого человека, которому приходится использовать дыхательный аппарат для работы в непригодной для дыхания среде при выполнении служебных обязанностей. Это является одним из

условий обеспечения безопасности при выполнении сложной и связанной с риском работой в непригодной для дыхания среде.

Недостатком применяемой в настоящее время компоновки дыхательных аппаратов является необходимость снятия аппарата из наспинного положения, отсоединения порожних баллонов от воздухопроводной и подвесной систем аппарата (минимум два резьбовых соединения), присоединение к ним и надевание аппарата в наспинное положение. Это делает значительным время восстановления работоспособности дыхательного аппарата. Кроме этого, в таких конструкциях баллоны не защищены от механических повреждений, повышенной температуры, открытого пламени.

Реализованное в рассматриваемом дыхательном аппарате сменное кассетное устройство, представляющее собой кожух, защищающий размещенные внутри него баллоны от механических повреждений, огня, повышенной температуры, объединяющий баллоны в единую конструкцию, и являющийся основой подвесной системы аппарата, к которой непосредственно крепятся ремни, изменяет подход к использованию и оснащению изолирующими средствами защиты органов дыхания. В этом случае индивидуальным является только воздухопроводная система аппарата с маской, а кассета с запасом воздуха и подвесной системой – предметом группового использования. Это позволяет оснастить большее число спасателей и пожарных дыхательными аппаратами при крупных ЧС при условии обеспечения зарядки воздухом на месте происшествия при наличии одинакового количества аппаратов при повседневном использовании. Кроме того, кассетное устройство можно использовать не только как дыхательный аппарат, но и как носимый запас сжатого газа для пневмоинструмента (пневмоподушек, пневморезаков и т.п.), при этом руки работающего останутся свободными для применения пневмооборудования.

Использование подобной компоновки позволяет снизить затраты на приобретение дыхательных аппаратов на величину, равную количеству спинок (рам), которые являются основой существующих дыхательных аппаратов и составляют значительную долю их стоимости (20–30 %) при возможности обеспечения каждого газодымозащитника индивидуальным дыхательным аппаратом.

Следует отметить, что на 4-й Международной выставке «Пожарная безопасность XXI века», проводившейся в 2005 в Москве [198], изолирующий воздушный дыхательный аппарат ИВА-Р20 (рисунки 3.6, 3.7, таблица 3.3) был награжден дипломом и медалью, а его конструкция признана лучшим техническим решением года.



Рисунок 3.6 – Общий вид изолирующего воздушного дыхательного аппарата ИВА-Р20



Рисунок 3.7 – Изолирующий воздушный дыхательный аппарат ИВА-Р20

Таблица 3.3 – Основные технические характеристики аппарата ИВА-Р20

Время защитного действия, мин.	53	93	115
Объем баллонов, л	6,8	8,8	10,8
Рабочее давление, МПа	22,5	31,4	
Масса аппарата, кг	3,0		
Габаритные размеры аппарата, мм	200×280×105		
Масса кассеты с баллонами, кг	5,5	8	11,5
Габаритные размеры кассеты, мм	450×380×195	450×395×195	450×395×210
Диапазон рабочих температур, °С	От минус 40 до 60 °С		

В таблице 3.4 для сравнения с техническими характеристиками ИВА-Р20 представлены основные технические характеристики изолирующих воздушных дыхательных аппаратов, нашедших широкое применение на практике.

Таблица 3.4 – Технические характеристики основных классов изолирующих дыхательных аппаратов в сравнении с техническими характеристиками аппарата ИВА-Р20

Параметры	Регенеративные ДА со сжатым кислородом	Регенератив- ные ДА с химически связанным кислородом	Регенератив- ные ДА с жидким кислородом	Резервуар- ные ДА	ИВА-Р20
Вес, кг	8 ÷ 14	6 ÷ 11	11 ÷ 15	14 ÷ 22	8,5 ÷ 14,5
Время защитного действия, мин.	120 ÷ 300	20 ÷ 300	180 ÷ 240	40 ÷ 70	53 ÷ 115
Удельное время защитного действия, мин.	10 ÷ 21	10 ÷ 29	13 ÷ 18	3 ÷ 5	6 ÷ 8
Сопротивление дыханию на вдохе, Па на выдохе, Па	100 200	150 420	180 270	0 200	0 200
Температура вдыхаемого воздуха, °С	40 ÷ 50	30 ÷ 40	20 ÷ 30	20 ÷ 30	20 ÷ 30
Возможность длительных перерывов в работе	есть	нет	нет	есть	есть
Индикатор расхода	есть	нет	нет	есть	есть
Готовность к использованию, мин	1	2	10	1	1

Как следует из таблицы 3.4 удельное время защитного действия аппарата ИВА-Р20 почти в два раза превышает аналогичный показатель для изолирующих воздушных дыхательных аппаратов, нашедших широкое применение на практике.

### **3.3 Моделирование повышения ресурса средств индивидуальной защиты органов дыхания участников тушения пожаров от опасных факторов**

Как описывалось выше, увеличение удельного времени защитного действия дыхательных аппаратов возможно тремя способами:

- 1) облегчением конструкции аппарата;
- 2) увеличением запаса сжатого газа;
- 3) экономным использованием ресурса аппарата.

Во второй главе показана зависимость результатов тушения пожаров объектов энергетики от бесперебойности подачи ОТВ в зону горения, одной из составляющих которой является время работы звена ГДЗС. Поэтому важным является рассмотрение вопроса возможности увеличения времени защитного действия СИЗОД и, как следствие, увеличение времени работы звена ГДЗС, чему и посвящено дальнейшее исследование.

Для рассмотрения возможности экономии ресурса применяемых для тушения пожаров объектов энергетики дыхательных аппаратов проведено исследование особенностей функционирования ДАСК.

### **3.3.1 Способ и модель увеличения удельного времени защитного действия регенеративных дыхательных аппаратов на сжатом кислороде**

В ДАСК содержание кислорода в дыхательной смеси намного превышает его потребность для дыхания. В 1950–1965 гг. в СССР и за рубежом были предприняты попытки изыскания способов кислородопитания с более экономным расходом сжатого кислорода. Однако было установлено, что при дыхании в этих аппаратах в состоянии покоя в определенных ситуациях возможно заазотирование, а при незначительных нагрузках аппарат более чувствителен к увеличенным подсосам воздуха, чем аппарат с комбинированной подачей кислорода. В связи с этим стали использоваться модели с комбинированной подачей кислорода, а изучение способов экономного расходования кислорода было прекращено [179]. Это обстоятельство потребовало изучения данного вопроса и изыскания способов устранения факторов, препятствующих осуществлению экономного расходования кислорода. Разработка подобных устройств возможна на основе изучения газообменных процессов в аппарате с учетом реальных условий работы на пожарах.

Анализ способов кислородопитания дыхательных аппаратов на сжатом кислороде показал, что область расходных характеристик зависит от работы питаю-

щих систем дыхательного аппарата, и что при постоянной (2 л/мин) и комбинированной (1,3–1,6 л/мин) подачах кислорода обеспечивается безопасность работы. Однако содержание кислорода превышает физиологически обоснованные нормы (1 л/мин) и, следовательно, запас кислорода расходуется неэкономно. Реализовать способ с экономным расходом кислорода (1,1 л/мин) затруднительно из-за влияния побочных факторов – увеличенного подсоса наружного воздуха и заазотирования воздухопроводной системы при незначительной нагрузке (см. табл. 3.5). Таким образом, для увеличения удельного времени защитного действия необходимо обеспечить безопасность дыхания на всех режимах работы.

Таблица 3.5 – Сравнительная характеристика способов кислородопитания регенеративных дыхательных аппаратов на сжатом кислороде

Способ кислородопитания	Потребление кислорода при средней нагрузке, л/мин	Расход кислорода при средней нагрузке, л/мин	Недостатки
Постоянная подача	1	2	Высокая концентрация кислорода
Комбинированная подача	1	1,3–1,6	Высокая концентрация кислорода
Экономное расходование	1	1	1. Подсосы извне 2. Заазотирование

Первым из двух недостатков аппаратов, в которых реализован способ кислородопитания с экономным расходом кислорода, является увеличение подсосов окружающего воздуха на дыхательных режимах, требующих небольшого потребления кислорода, а следовательно, значительной величины разрежения в воздухопроводной системе. Подсосы возникают вследствие легочно-автоматического способа подачи кислорода, реализованного в этих аппаратах. Срабатывание клапана подачи кислорода происходит при вдохе в момент наибольшего спада дыхательного мешка. При этом создается разрежение в воздухопроводной системе аппарата, являющееся причиной увеличенных подсосов окружающего воздуха.

Для оценки этого влияния обоснован показатель напряжения потока подсоса, позволяющий рассчитать величины подсоса при различной нагрузке и различных способах кислородопитания:

$$Q_p = (p_m + k \cdot p_1) / 2W_1, \quad (3.2)$$

где  $p_m$  – среднее сопротивление дыханию, Па;

$k$  – коэффициент способа кислородопитания;

$p_1$  – разрежение срабатывания легочного автомата, Па;

$W_1$  – легочная вентиляция, л/мин.

Избежать этого можно созданием избыточного, относительно окружающего воздуха, давления внутри аппарата или, по крайней мере, равенства давлений внутри и снаружи аппарата. Одним из вариантов осуществления этого процесса является наполнение в период выдоха воздухопроводной системы таким количеством дыхательной смеси, чтобы его хватало на вдох. В этом случае глубокого разрежения при вдохе создаваться не будет.

Для того, чтобы без создания разрежения в воздухопроводной системе респиратора с экономным расходом запаса кислорода осуществить подачу порции кислорода для каждого вдоха человека, предлагается использовать энергию выдоха, предыдущего вдоху. Таким образом, к началу процесса вдоха дыхательный мешок будет наполнен очищенным от углекислого газа выдохнутым воздухом и порцией уже поступившего из баллона кислорода в количестве, достаточном для вдоха.

Расчеты показывают, что применение метода позволяет снизить уровень подсосов до величины, близкой к безопасной (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Зависимость уровня подсоса при различных методах легочно-автоматического кислородопитания от нагрузки

Показатели	Нагрузка		
	Легкая	Средняя	Тяжелая
Напряжение потока подсоса при легочно-автоматическом кислородопитании, Па·мин/л	9,9–12,3	7,2–8,2	3,6–4
Напряжение потока подсоса при легочно-автоматическом кислородопитании без учета работы легочного автомата, Па·мин/л	7,1–9,5	6–7	3,2–3,6
Напряжение потока подсоса, создаваемое включением легочного автомата, Па·мин/л	2,8	1,2	0,4

Вторым недостатком способа кислородопитания с экономным расходом кислорода является заазотирование воздухопроводной системы, что ведет к снижению концентрации кислорода ниже уровня, необходимого для дыхания. Об этом свидетельствуют, например, случаи заазотирования многих опытных образцов респираторов при их лабораторных испытаниях вследствие неудачного принципиального или конструктивного решения продувки от скопления азота [199].

Поскольку заазотирование ведет к кислородному голоданию и потере сознания, обеспечение необходимого содержания кислорода во вдыхаемом воздухе является вопросом обеспечения безопасной работы в аппарате.

Скопление азота и других инертных компонентов в дыхательной системе аппарата возможно, если не вся дыхательная смесь участвует в дыхании, то есть при наличии излишнего (нерабочего) объема. На низших дыхательных режимах он больше, а при тяжелой работе его вообще не существует, так как объем дыхательной системы равен объему дыхания.

Для количественной оценки данного процесса разработана временная модель заазотирования. Время начала заазотирования системы:

$$T_n = \Delta V / W_n, \quad (3.3)$$

где  $\Delta V$  – объем невентилируемых участков, л;

$W_n$  – величина потока подсоса, л/мин.

Время снижения концентрации кислорода до опасного предела:

$$T_f = V_t / W_n, \quad (3.4)$$

где  $V_t$  – объем дыхания, л.

В то время как промежуток времени до срабатывания избыточного клапана (сравливания инертных компонентов в атмосферу) составит:

$$T_r = V_b - (V_t + \Delta V) / W_n + W_r, \quad (3.5)$$

где  $V_b$  – объем дыхательного мешка, л;

$W_r$  – продувка кислородом, л/мин.



Как показывают проведенные расчеты, при легкой нагрузке безопасность дыхания при легочно-автоматическом кислородопитании регенеративных аппаратов обеспечивается при величине коэффициента подсоса ( $K_p$ ) до 0,007, так как в этом случае продувка наступает раньше замещения кислорода азотом (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Зависимость времени заазотирования воздуховодной системы в режиме легкой нагрузки от величины коэффициента подсоса

$K_p$	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01
$W_n$ , л/мин	0	0,003	0,01	0,018	0,025	0,045
$T_r$ , мин	70	67	60	53	49	39
$T_n$ , мин	0	133	40	22	16	9
$T_f$ , мин	0	233	70	38	28	16

Если объем воздуховодной системы будет равен объему дыхания инертные компоненты будут стравливаться за пределы аппарата вместе с излишком дыхательной смеси через избыточный клапан. Поэтому необходимо искусственно регулировать, в зависимости от дыхательного режима, объем воздуховодной системы. В этом случае вся дыхательная смесь будет циркулировать, исключив образование нерабочих объемов, и, следовательно, скопление инертных элементов.

Подача кислорода и выпуск через избыточный клапан части дыхательной смеси должны происходить в пределах изменения объема дыхательной системы. Управление объемом воздуховодной системы нужно осуществлять так, чтобы при тяжелой физической работе объем дыхательного мешка составлял 4,5–5 л, а во время отдыха 0,5–0,7 л. Таким образом устройство должно обеспечить изменение объема дыхательной системы в этих пределах.

Совместное применение в аппаратах систем кислородопитания с экономным расходом кислорода от давления выдоха и регулировки объема воздуховодной системы позволит обеспечить безопасность работ и экономное кислородопитание регенеративных аппаратов на сжатом кислороде. Результаты вычислений, проведенных согласно существующей методике расчета ВЗД дыхательных аппаратов и промышленно выпускаемых малолитражных баллонов, дают возможность оценить преимущества способа кислородопитания с экономным расходом кислорода (рисунок 3.8).

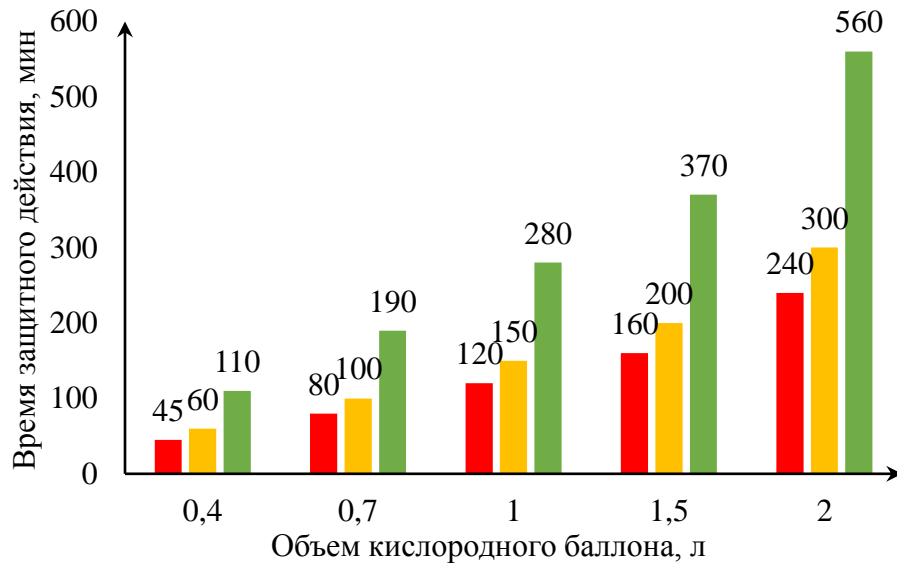


Рисунок 3.8 – Время защитного действия при различных способах кислородопитания и объемах кислородных баллонов регенеративных аппаратов:

- – время защитного действия РДА с комбинированной подачей кислорода;
- – время защитного действия РДА с экономным расходом кислорода в режиме средней нагрузки;
- – время защитного действия РДА с экономным расходом кислорода в режиме отдыха

При основной расчетной нагрузке время защитного действия возрастает на 18–20 % по сравнению с комбинированной подачей кислорода. В режиме отдыха время защитного действия увеличивается в 2,4–2,5 раза, при увеличении дыхательной нагрузки выше средней тяжести расход кислорода аналогичен респираторам с комбинированной подачей кислорода без учета расхода кислорода, используемого для продувки. Так как предложенные устройства будут частично заменять существующие узлы в аппарате, то их применение не должно вызвать увеличения общей массы аппарата.

### **3.3.2 Способ и модель увеличения удельного времени защитного действия резервуарных дыхательных аппаратов с открытой схемой дыхания**

Увеличение времени защитного действия ДАСВ достигается повышением рабочего давления в баллонах, которое ограничено пределом прочности и массой баллона [200]. При детальном изучении механизма работы дыхательного аппарата сжатого воздуха было замечено, что дыхательная смесь полностью не используется из-за особенностей конструкции лицевой части и физиологии дыхательных путей человека, что позволило поставить вопрос об экономии ресурса на основе более полного использования дыхательной смеси [201]. Для комплексного подхода к проблеме увеличения удельного времени защитного действия проанализированы все методы защиты дыхания человека с точки зрения эффективного применения при тушении пожаров, при этом особое внимание было уделено соотношению веса и времени защитного действия [176].

В аппарате с открытой схемой дыхания при каждом выдохе наружу только из воздухоносных путей человека выбрасывается объем смеси, пригодной для дыхания, равный объему анатомического мертвого пространства. Также при выдохе выталкивается за пределы аппарата большая часть воздуха из подмасочного пространства. Анатомическое мертвое пространство воздухоносных путей и подмасочное пространство лицевой части дыхательного аппарата при каждом вдохе заполняется дыхательной смесью из баллона и при каждом выдохе выталкивается наружу (за пределы клапана выдоха аппарата), то есть бесполезно расходуя запас сжатого воздуха, уменьшая время защитного действия. Эти потери зависят от интенсивности дыхания, а также от индивидуальной формы лица, строения воздухоносных путей человека и лицевой части дыхательного аппарата.

Этих потерь можно избежать. Для этого предлагается первую порцию выдыхаемого воздуха, газовый состав которой равен газовому составу вдыхаемого воздуха, отобрать в отдельный резервуар, вместо того чтобы стравливать за пределы

аппарата. При следующем вдохе – подать заранее отобранную порцию до поступления воздуха из баллона (до срабатывания легочного автомата). Для того, чтобы резервуар отбора наполнился именно первой порцией выдыхаемого воздуха, не участвующей в легочном газообмене, давление открытия клапана выдоха дыхательного аппарата должно быть больше давления, при котором наполнится резервуар. Для обеспечения опорожнения резервуара при вдохе необходимо, чтобы разрежение срабатывания легочного автомата было больше разрежения опорожнения резервуара. Только в этом случае порция воздуха из резервуара подается первой, а к ней добавляется воздух из баллона. Таким образом, при каждом вдохе расход воздуха из баллона уменьшается на величину объема воздуха из резервуара, что позволяет решить основную задачу по увеличению времени защитного действия, оставив массу неизменной, или облегчить дыхательный аппарат при том же сроке защитного действия.

При выдохе движение воздуха происходит следующим образом: через клапан выдоха за пределы аппарата сначала поступает порция воздуха, заполнявшая подмасочное пространство, затем – мертвое пространство дыхательных путей человека, и в последнюю очередь – воздух из легких. При вдохе последовательность такова: в легкие поступает порция воздуха из мертвого пространства дыхательных путей человека, как это и происходит при обычном дыхании в свободной атмосфере, затем - из подмасочного пространства, и в последнюю очередь – из баллона аппарата сжатого воздуха.

Таким образом, уравнение баланса фаз вдоха-выдоха будет выглядеть следующим образом:

$$V_i = k V_i', \quad (3.6)$$

где  $V_i$  – объем вдоха,

$V_i'$  – объем выдоха;

$k$  – дыхательный коэффициент.

Для вывода дальнейших зависимостей примем некоторые допущения:

1) объемы вдыхаемого и выдыхаемого воздуха равны между собой и характеризуются изменением геометрической вместимости легких. На самом деле объем

выдыхаемого воздуха несколько меньше, чем вдыхаемого, в связи с тем, что дыхательный коэффициент имеет во всех случаях значение меньше единицы (0,75–0,99), потому как не весь объем поглощенного кислорода замещается равноценным объемом углекислого газа. Погрешность при этом допущении не превышает 1 %;

2) объем подмасочного и мертвого пространства будет при вдохе полностью замещаться воздухом из баллона, а при выдохе – из легких. Это подтверждает сравнение объема минимального вдоха и максимальной суммы подмасочного и мертвого пространств;

3) весь объем подмасочного пространства участвует в движении дыхательного воздуха;

4) объем воздуха, в котором происходит изменение концентрации кислорода и углекислого газа на границе альвеолярного воздуха и воздуха из анатомического мертвого пространства, относить к альвеолярному объему;

5) пренебрегаем величиной подсосов ввиду ее незначительности (около 0,002).

Математическая модель дыхания в резервуаре с открытой схемой изменится следующим образом:

$$V_b + V_u + V_z + V_f = V_u' + V_z' + V_a + V_f', \quad (3.7)$$

где  $V_b$  – объем воздуха, вдыхаемый из баллона аппарата;

$V_u$  – объем воздуха, вдыхаемый из подмасочного пространства;

$V_z$  – объем воздуха, поступающий в легкие из анатомического мертвого пространства;

$V_f$  – объем воздуха, вдыхаемый из резервуара отбора;

$V_u'$  – объем воздуха, выдыхаемый из подмасочного пространства;

$V_z'$  – объем воздуха, выдыхаемый из анатомического мертвого пространства;

$V_a$  – объем воздуха, выдыхаемый из легких;

$V_f'$  – объем воздуха, выдыхаемый в резервуар отбора.

Система условий безопасности при дыхании по предложенной схеме будет представлена следующими системами уравнений:

$$\begin{cases} V_b S_b + V_u S_u + V_z S_z + V_f S_f = V_t S_0 \\ V_b C_b + V_u C_u + V_z C_z + V_f C_f = V_t C_0 \end{cases}; \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} V'_a S'_a + V'_u S'_u + V'_z S'_z + V'_f S'_f = V'_t S'_0 \\ V'_a C'_a + V'_u C'_u + V'_z C'_z + V'_f C'_f = V'_t C'_0 \end{cases}; \quad (3.9)$$

где  $S_f$  – содержание  $O_2$  в объеме воздуха, вдыхаемого из резервуара отбора;

$C_f$  – содержание  $CO_2$  в объеме воздуха, вдыхаемого из резервуара отбора;

$S'_f$  – содержание  $O_2$  в объеме воздуха, отбираемого в резервуар;

$C'_f$  – содержание  $CO_2$  в объеме воздуха, отбираемого в резервуар.

Как видно из систем уравнений (3.8) и (3.9), при условии  $V_u + V_z = V_f$  и  $V'_u + V'_z = V'_f$ , объем воздуха, отбираемый в резервуар, компенсирует потери той части дыхательной смеси, которая выбрасывалась из анатомического мертвого и подмасочного пространств.

Уравнение баланса поступления воздуха из баллона с выдохом в атмосферу еще более наглядно показывает механизм экономии сжатого воздуха:

$$V_b - V_f = V_a - V'_f. \quad (3.10)$$

Расчет экономии дыхательного воздуха при использовании части дыхательной смеси на последующий вдох будет производиться согласно математической модели внешнего дыхания. Частота дыхания при работе в аппарате колеблется от 10 до 35 дыхательных циклов в минуту; объем вдоха – от 600 до 3000 см<sup>3</sup>; анатомическое мертвое пространство в среднем от 140 до 160 см<sup>3</sup>; физиологическое (при большой нагрузке) – до 440 см<sup>3</sup>; объем вредного пространства панорамной дыхательной маски с подмасочником от 180 до 220 см<sup>3</sup>. В дальнейших расчетах использовалась нижняя граница вредного пространства маски ввиду того, что не весь воздух из подмасочного пространства участвует в дыхательном цикле.

Анатомическое мертвое пространство у большинства людей постоянно и отличается на незначительную величину, поэтому далее принято среднее значение этой величины.

Физиологическое же мертвое пространство индивидуально и зависит не

только от строения воздухопроводных путей, но и от диффузионно-перфузионных отношений, физического и психического состояния человека. Его нужно определять для конкретного индивидуума на разных дыхательных режимах, поэтому из дальнейших расчетов оно исключено.

Таким образом, количество неиспользуемого воздуха за один дыхательный цикл не зависит от интенсивности дыхания и представляет собой сумму эффективного вредного подмасочного и анатомического мертвого пространств:

$$V_{res} = V_u' + V_z', \quad (3.11)$$

где  $V_u'$  – объем воздуха, выдыхаемый из подмасочного пространства, л;

$V_z'$  – объем воздуха, выдыхаемый из анатомического мертвого пространства, л.

Произведение этого суммарного объема на частоту дыхания является расходом дыхательной смеси, не участвующей в газообмене при дыхании:

$$W_{res} = V_{res} n_i, \quad (3.12)$$

где  $n_i$  – частота дыхания при определенном дыхательном режиме, мин<sup>-1</sup>.

Как отмечалось, величина  $W_{res}$  не зависит от легочной вентиляции, поэтому соотношение с легочной вентиляцией, то есть с общим расходом воздуха при дыхании, в процентах, будет иметь вид:

$$\Delta W = 100W_{res} / W, \quad (3.13)$$

где  $W$  – легочная вентиляция, л/мин.

В результате расчетов получилось, что  $V_{res}$  составляет 320 см<sup>3</sup> (180 см<sup>3</sup> – эффективное подмасочное пространство и 140 см<sup>3</sup> – анатомическое мертвое пространство).

Согласно принятой величине расчетной нагрузки для определения времени защитного действия средняя частота дыхания равна 20 мин<sup>-1</sup>. Следовательно, экономия дыхательной смеси будет около 6,4 л/мин. При среднем расчетном расходе 30 л/мин экономия смеси составит 21 % за аппарато-смену. В режиме ожидания помощи (частота дыхания 15 мин<sup>-1</sup>, легочная вентиляция 10,5 л/мин) – 4,5 л/мин или 43%.

Дыхание человека характеризуется восьмью параметрами: потреблением кислорода в единицу времени  $W_s$  при относительном объеме  $S_o$ ; выделением углекислого газа в таком же выражении, т.е.  $W_c$  и  $C_o$ ; дыхательным коэффициентом  $K_{\text{дых}}$ ; легочной вентиляцией  $W_{\text{л}}$ ; частотой дыхания  $n$  и дыхательным объемом  $V_t$ . Совокупность взаимосвязанных значений указанных параметров называется дыхательным режимом.

Из восьми параметров четыре являются определяющими ( $W_c$ ,  $W_{\text{л}}$ ,  $K_{\text{дых}}$  и  $n$ ). Главный из них – выделение углекислого газа  $W_c$ , характеризующее уровень энергетического обмена в организме.

Во всем диапазоне дыхания человека может быть множество дыхательных режимов. При изучении внешнего дыхания человека для инженерных расчетов и оценки респираторов принята дискретная система дыхательных режимов, включающая 15 энергетических уровней дыхания. Каждый из таких режимов имеет порядковый номер и отличается от соседнего по главному определяющему параметру – выделению углекислого газа – на 0,2 л/мин. Так, для режима №4 выделение углекислого газа составляет 0,2 л/мин, для режима №5 – 1 л/мин, а для режима №15 – 3 л/мин.

Значения  $W_{\text{л}}$ ,  $K_{\text{дых}}$  и  $n$  для каждого из 15 режимов определены при анализе экспериментальных данных, полученных разными авторами, которые изучали изменение дыхательной функции человека при различном физическом напряжении. Работы проводились при обычном атмосферном давлении, которое следует считать равным 99,3 кПа, а все объемы газов, в том числе легочные ( $V_t$ ,  $W_{\text{л}}$ ), приведены при стандартных физических условиях. При таких же условиях эти данные использованы для построения системы дыхательных режимов. Были определены усредненные, наиболее часто встречающиеся значения,  $W_{\text{л}}$ ,  $K_{\text{дых}}$  и  $n$ , соответствующие каждому уровню  $W_c$ , а также их отклонения в большую или меньшую сторону. Для  $W_{\text{л}}$  и  $K_{\text{дых}}$  была принята линейная зависимость от  $W_c$ . Закономерность изменения частоты дыхания в экспериментах была нечеткой. Но для упрощения имитации внешнего дыхания принято ступенчатое изменение ее через 5 (1/мин) (таблица 3.8).



Таблица 3.8 – Дыхательные режимы

Значение параметра	Номер дыхательного режима														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$W_c$ , л/мин	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3
Увеличенная $W_l$ , л/мин	7	12,5	$W_l = 6j$					$W_l = 60 + 5(j - 10)$							
Основная $W_l$ , л/мин	6	10,5	$W_l = 5j$					$W_l = 50 + 4(j - 10)$							
Уменьшенная $W_l$ , л/мин	5	8,5	$W_l = 4j$					$W_l = 40 + 3(j - 10)$							
Увеличенный $K_{дых}$	$K_{дых} = 0,95 + 0,005j$					$K_{дых} = 1 + 0,1(j - 10)$									
Основной $K_{дых}$	$K_{дых} = 0,85 + 0,005j$					$K_{дых} = 0,9 + 0,1(j - 10)$									
Уменьшенный $K_{дых}$	$K_{дых} = 0,75 + 0,005j$					$K_{дых} = 0,8 + 0,1(j - 10)$									
Увеличенная $n$ , мин <sup>-1</sup>	20			25			30			35					
Основная $n$ , мин <sup>-1</sup>	15			20			25			30					
Уменьшенная $n$ , мин <sup>-1</sup>	10			15			20			25					

Примечание:  $j$  – номер дыхательного режима

Значения же остальных параметров определяются по приведенным в таблице формулам. Из нее видно, что для каждого дыхательного режима возможно 7 комбинаций значений  $W_l$ ,  $K_{дых}$  и  $n$ . Одна из них соответствует основному, усредненному значению – это основной дыхательный режим. Остальные 6 комбинаций соответствуют увеличенному или уменьшенному значению трех параметров – это дополнительные дыхательные режимы. Таким образом, система содержит 15 основных и 90 дополнительно дыхательных режимов, охватывающих диапазон дыхания человека как по энергетическому уровню, так и по индивидуальным отклонениям отдельных параметров.

При необходимости система дыхательных режимов может быть расширена за счет дополнительных режимов, в каждом из которых отклоняются от номинального значения не один из параметров  $W_l$ ,  $K_{дых}$  и  $n$ , а два или три. В этом случае число дополнительных режимов на каждый основной увеличится до 26, а общее количество основных и дополнительных режимов составит 405.

Необходимо отметить, что энергетическая характеристика дыхательного режима №5, равная 400 Вт, несколько больше, чем принято для физической работы

средней тяжести. Тем не менее, принятие дыхательного режима №5 в качестве расчетной и испытательной нагрузки для дыхательных аппаратов правомерно, так как учитывает повышенную энергонапряженность работ и создает дополнительный резерв защитной способности [179].

По нему ведется расчет времени защитного действия дыхательных аппаратов. Потери дыхательной смеси при использовании различных лицевых частей приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Величины потерь дыхательной смеси в зависимости от дыхательного режима

Режим	Параметры режима: частота / вентиляция	Величины потерь дыхательной смеси, %		
		Мундштучное приспособление	Панорамная маска	Шлем-маска
2	15 мин <sup>-1</sup> / 10,5 л/мин	29	43	50
5	20 мин <sup>-1</sup> / 25 л/мин	16	24*	28
10	25 мин <sup>-1</sup> / 50 л/мин	10	15	18
15	30 мин <sup>-1</sup> / 70 л/мин	9	13	15

\* величина основной расчетной нагрузки при использовании панорамной маски

Расчет экономии дыхательной смеси можно также провести, основываясь на статистически подтвержденном средневзвешенном показателе энергетической эргономики, в который заложено время работы на каждом дыхательном режиме в течение аппарата-смены:

$$Q = 0,15N_2 + 0,44N_5 + 0,28N_{10} + 0,13N_{15} \quad (3.14)$$

В данном случае формула для оценки  $\Delta W$  будет иметь вид:

$$\Delta W = 0,15\Delta W_2 + 0,44\Delta W_5 + 0,28\Delta W_{10} + 0,13\Delta W_{15} \quad (3.15)$$

Произведенный расчет показывает, что  $\Delta W = 22,9 \%$ , следовательно, при разных вариантах расчета величины вполне согласуются.

Потери дыхательного воздуха происходят во всех типах СИЗОД с открытой схемой дыхания, при этом данная проблема наиболее остро стоит для аппаратов, имеющих ограниченный ресурс (фильтрующих и резервуарных). Рассмотрение фильтрующих СИЗОД не является предметом исследования в настоящей

работе, так как их применение на пожаре крайне ограничено, поэтому дальнейшее внимание будет уделено для резервуарным изолирующим дыхательным аппаратам.

Характер зависимости величин легочной вентиляции и мертвого пространства от номера дыхательного режима показан на рисунке 3.9, а отношения объема вдоха с мертвым пространством – на рисунке 3.10

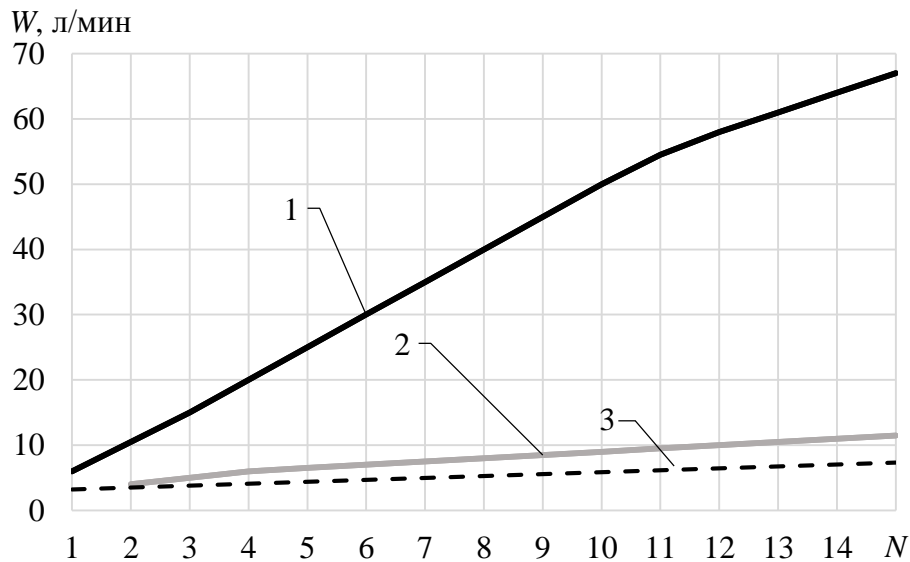


Рисунок 3.9 – Зависимости величин легочной вентиляции (1), физиологического (2) и анатомического (3) мертвого пространства от номера дыхательного режима  $N$

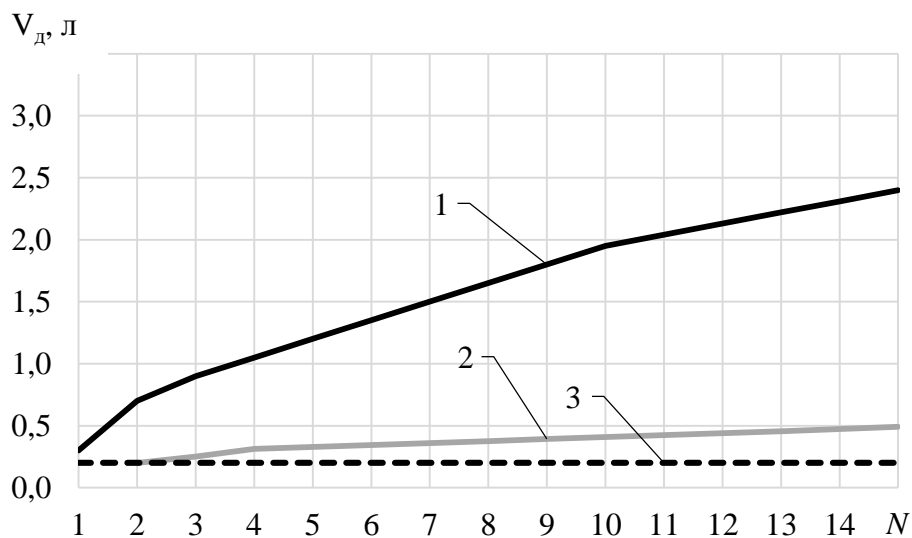


Рисунок 3.10 – Зависимости объема вдоха (1), физиологического (2) и анатомического (3) от номера дыхательного режима  $N$

При применении СИЗОД и изолирующих костюмов, защищающих дыхание, при каждом выдохе под лицевой частью скапливается некоторое количество выдыхаемого воздуха, обогащенного диоксидом углерода, которое вновь вдыхается при следующем вдохе. Пространство под лицевой частью (маской или полумаской) является вследствие этого дополнительным «мертвым» или, как его еще называют, «вредным» пространством. Поэтому увеличение «мертвого» или «вредного» пространства, образующегося под лицевой частью, углубляет дыхательные движения и увеличивает общий объем вентиляции легких (минутный объем дыхания). Чем больше это дополнительное пространство в конструкции СИЗОД, тем больше скапливается диоксида углерода под лицевой частью, увеличивается темп дыхания, как следствие, происходит возбуждение нервной системы под влиянием поступающего в организм диоксида углерода. На такой эффект влияет не только объем подмасочного пространства СИЗОД, но и конструкция лицевой части СИЗОД, наличие, расположение и количество клапанов вдоха, выдоха.

Содержание диоксида углерода под маской может быть существенно уменьшено или вовсе устранено при принудительной подаче воздуха или газовой смеси в СИЗОД. В автономных СИЗОД вдыхаемая газовая смесь может содержать некоторое количество диоксида углерода, если имеющееся в этих СИЗОД специальное устройство не полностью его поглощает.

Характер изменения концентрации углекислого газа при дыхании таков (рисунок 3.11): в конце нормального вдоха уровень  $\text{CO}_2$  близок к нулю. В течение следующего за ним выдоха концентрация  $\text{CO}_2$  возрастает после того, как наполнится внутреннее мертвое пространство. Она продолжает возрастать, и в конце выдоха достигает самого высокого уровня. Если бы дыхание осуществлялось без каких-либо приспособлений, то концентрация  $\text{CO}_2$  падала бы до нуля, пока не начался вдох.

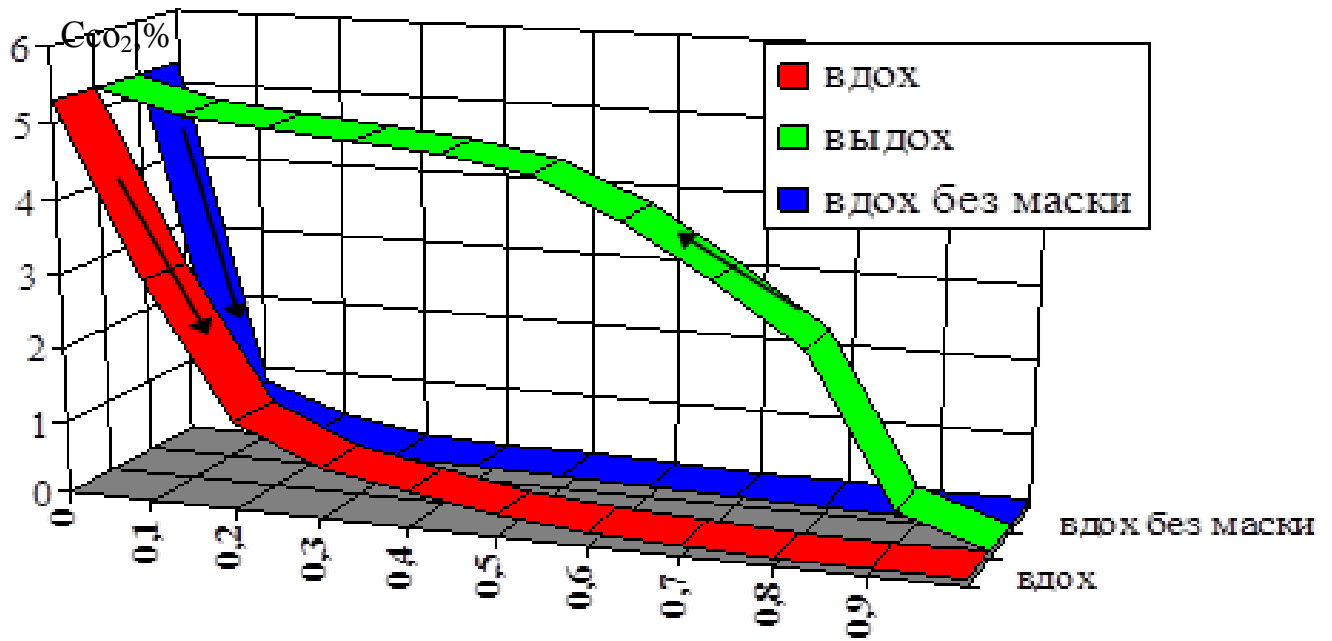


Рисунок 3.11 – Зависимость концентрации углекислого газа от объема вдоха при свободном дыхании и вдохе в маске с подмасочником

Мертвое пространство можно определить по следующей формуле:

$$V_d = V_{CO_2} / et_{CO_2}, \quad (3.16)$$

где  $V_{CO_2}$  – объем  $CO_2$  во вдыхаемом воздухе;

$et_{CO_2}$  – парциальное давление углекислого газа в выдыхаемом воздухе.

Очевидно, что увеличение объема  $CO_2$  во вдыхаемом воздухе связано с увеличением мертвого пространства.

Для полнолицевой маски с хорошо подогнанным подмасочником наличие повышенного содержания  $CO_2$  в объеме вдыхаемого воздуха не превышает 60 %. Из них концентрация больше 1 %  $CO_2$  на протяжении одной трети вдоха.

В случае использования полнолицевой маски с большим мертвым пространством изменения концентрации  $CO_2$  будут происходить согласно графику (рисунок 3.12).

Так как маска изнутри будет омываться, то концентрация  $CO_2$  будет снижаться медленно и даже может не достигнуть нуля во время вдоха. Поскольку уровень  $CO_2$  не доходит до нуля в конце вдоха, в мертвом пространстве концентрация может возрастать, накапливаясь в объеме мертвого пространства. Мертвое пространство дыхательных аппаратов влияет на уровень легочной вентиляции и на используемый для дыхания газ.

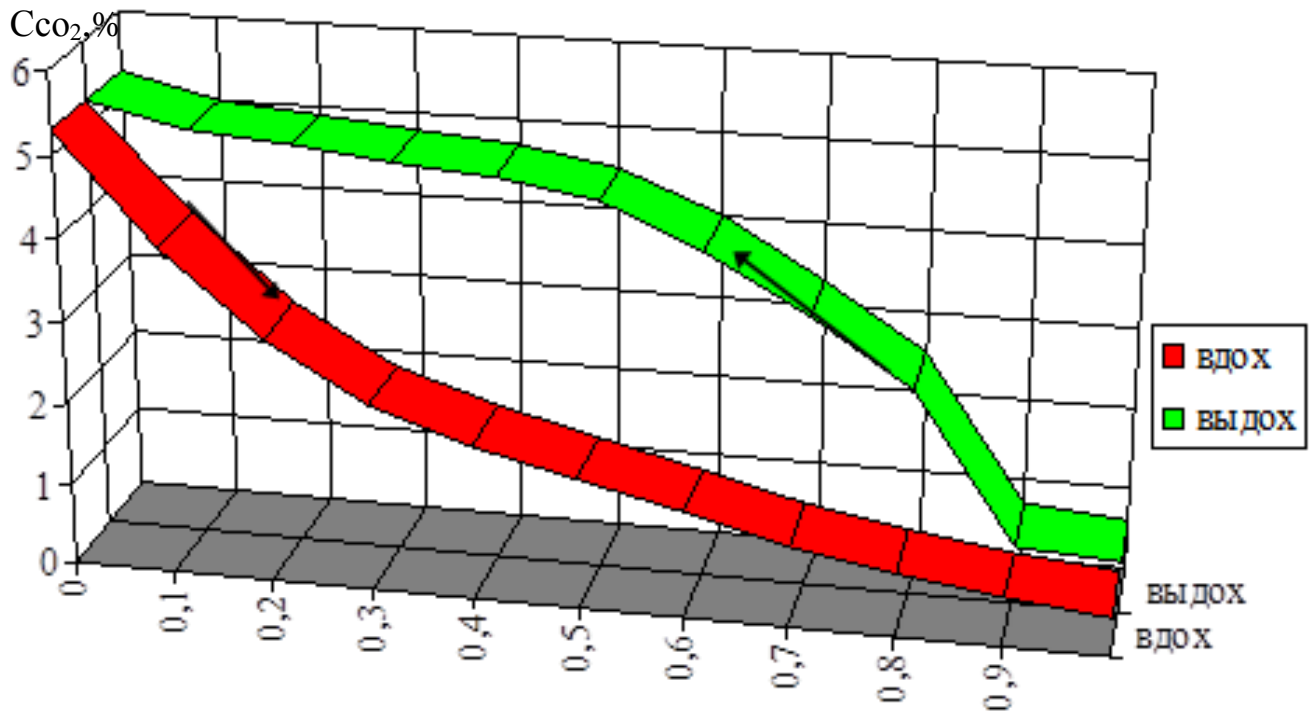


Рисунок 3.12 – Зависимость концентрации углекислого газа от объема вдоха при дыхании в полнолицевой маске

Основываясь на приведенной расчетной модели и принимая во внимание ограничения, связанные с характером распределения концентрации углекислого газа в системе «человек – дыхательный аппарат с открытой схемой дыхания» проведен расчет экономии дыхательной смеси в зависимости от легочной вентиляции (рисунок 3.13).

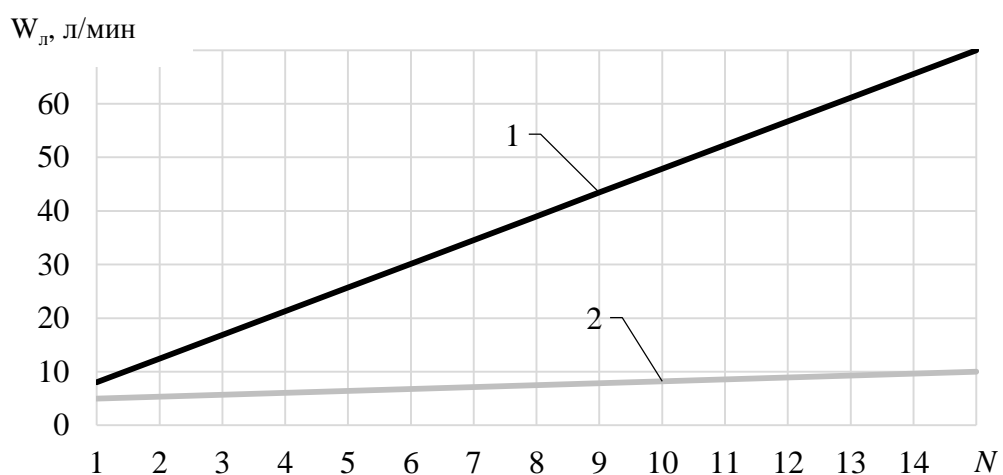


Рисунок 3.13 – Зависимость легочной вентиляции (1)

и экономии дыхательной смеси (2) от номера дыхательного режима  $N$

Зависимость экономии дыхательного воздуха от нагрузки (дыхательного режима) представлена на рисунке 3.14.

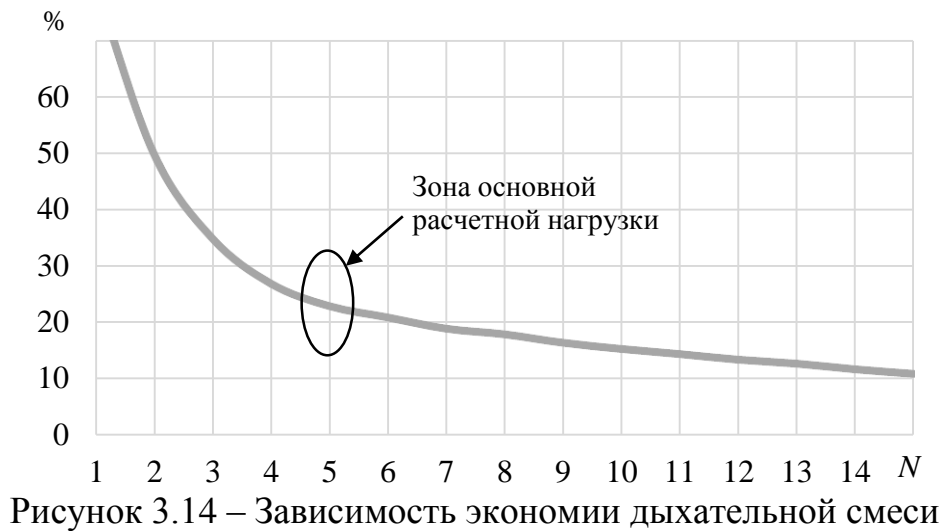


Рисунок 3.14 – Зависимость экономии дыхательной смеси (в % к легочной вентиляции) от номера дыхательного режима  $N$

Для увеличения удельного времени защитного действия аппаратов сжатого воздуха возможно использовать часть выдыхаемого воздуха из анатомического мертвого пространства дыхательных путей человека и подмасочного пространства, не принимавшую участие в легочном газообмене, пригодную для дыхания по газовому составу. При выдохе пригодную для дыхания часть выдыхаемого воздуха предлагается использовать при следующем вдохе, тем самым снизив потребность в сжатом воздухе из баллона. Расчетное значение полученной таким образом экономии дыхательной смеси составляет  $22 \div 24$  % при нагрузке средней тяжести и около 40 % в режиме отдыха (ожидания помощи).

Устройство для экономного расходования запаса сжатого воздуха должно отобрать из объема выдыхаемого воздуха первую порцию, газовый состав которой пригоден для дыхания, а затем подать ее на следующий вдох. Это должен быть эластичный резервуар, параметры которого позволят учесть процесс дыхания в данном аппарате. В начале выдоха в него должна попасть первая порция выдыхаемого воздуха, остальной выдыхаемый воздух должен быть направлен через клапан выдоха за пределы аппарата.

Для того, чтобы резервуар отбора наполнился именно первой порцией выдыхаемого воздуха, не участвующей в легочном газообмене, давление открытия клапана выдоха дыхательного аппарата должно быть больше давления, при котором

наполнится резервуар. Объем отбираемого воздуха должен быть равен сумме анатомического мертвого и подмасочного пространств и не должен вмещать более того, так как это приведет к повышению концентрации углекислого газа. Ограничить это поступление можно жестким корпусом или перекрытием отверстия, через которое поступает воздух. При следующем вдохе следует подать эту заранее отобранную порцию. Это можно осуществить до поступления воздуха из баллона (до срабатывания легочного автомата) или на протяжении всего вдоха. В этом случае необходимо какое-либо побудительное усилие. Если подавать порцию до поступления воздуха из баллона, то для обеспечения опорожнения резервуара при вдохе необходимо, чтобы разрежение срабатывания легочного автомата было больше разрежения опорожнения резервуара.

Таким образом, для работы резервуара отбора необходимо осуществить выбор материала стенок резервуара, разработку его конструкции и конструкции и объема ограничивающего кожуха.

Резервуар для отбора порции выдыхаемого воздуха по характеру функционирования идентичен дыхательному мешку, поэтому в дальнейшем условимся называть его малый дыхательный мешок (мини-ДМ). Местом отбора воздуха должно быть подмасочное пространство, так как только в нем циркулирует дыхательный воздух и при вдохе, и при выдохе. Резервуар должен располагаться вблизи подмасочного пространства, вероятнее всего, входить конструктивной частью в маску.

Проведенные опытно-конструкторские работы позволили вывести следующую схему особенностей устройства для реализации данного способа:

- ограничение объема резервуара производить за счет жесткого кожуха, объем эластичной части мешка в свободном состоянии должен быть равен объему кожуха и повторять его конфигурацию;
- эластичность стенок и способы их сочленения должны обеспечивать спадание и раскрытие резервуара в диапазоне ниже срабатывания легочного автомата и клапана выдоха;
- резервуар должен быть съемным;



– кожух должен обеспечивать степень защиты эластичной части от механических повреждений не ниже, чем маски в целом.

Устройство для реализации предложенного способа было разработано на базе существующих моделей масок, наиболее часто используемых подразделениями пожарной охраны (рисунки 3.15 и 3.16).

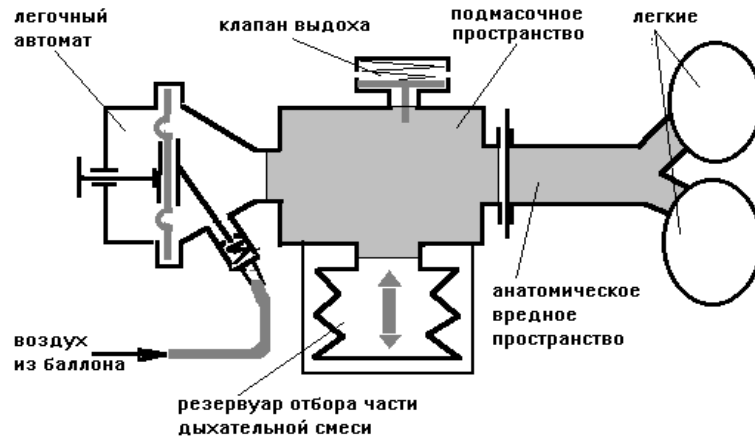


Рисунок 3.15 – Схема устройства для отбора и последующей подачи на вдох части дыхательного воздуха в резервуарном аппарате, не участвующего в легочном газообмене



Рисунок 3.16 – Внешний вид устройства для отбора и последующей подачи на вдох части дыхательного воздуха в резервуарном аппарате, не участвующего в легочном газообмене

Для увеличения удельного времени защитного действия аппаратов сжатого воздуха возможно использовать часть выдыхаемого воздуха из анатомического мертвого пространства дыхательных путей человека и подмасочного пространства,

не принимавшую участие в легочном газообмене, пригодную для дыхания по газовому составу. При выдохе первая часть (около 300 см<sup>3</sup>) отбирается в отдельный резервуар, а остальной воздух стравливается за пределы аппарата. При следующем вдохе эта порция подается первой, затем к ней добавляется воздух из баллона.

### **3.4 Экспериментальная оценка увеличения ресурса средств индивидуальной защиты органов дыхания для тушения пожаров в зданиях объектов энергетики**

Исследование возможности экономии запаса сжатого воздуха в ДАСВ производится с целью ответа на следующие вопросы:

- на сколько применение способа увеличит удельное время защитного действия;
- какое влияние на другие эргономические параметры окажет введение в схему дыхания дополнительного устройства.

Для ответов на эти вопросы выполнены следующие серии экспериментов:

- исследование газового состава дыхательного воздуха, отобранного в резервуар;
- оценка влияния использования резервуара для отбора части дыхательной смеси на сопротивление дыханию в аппарате;
- выявление величины экономии дыхательной смеси.

Анализ результатов теоретического исследования применения резервуара для отбора части дыхательной смеси в резервуарном дыхательном аппарате говорит о том, что увеличение концентрации углекислого газа должно происходить после отбора первых 300 мл выдыхаемого воздуха. Характер нарастания концентрации углекислого газа расчетным путем проследить сложно. Предполагается, что он не будет стабильным и будет зависеть от состояния воздухопроводных путей человека, интенсивности выдоха конструкции маски, вариантов расположения и исполнения резервуара отбора.

Результаты проведенных испытаний позволяют отметить следующее:

– практически возможно производить отбор части выдыхаемого воздуха, не участвующей в легочном газообмене, и подачу ее на следующий вдох для обеспечения экономии ресурса резервуарного аппарата. Однако выявлено, что при некоторых режимах возникают процессы, влияющие на эффективность способа;

– характер нарастания концентрации углекислого газа в зависимости от объема резервуара отбора представлен на рисунке 3.17. Параллельно замерялась концентрация кислорода в резервуаре, которая во всех случаях была не менее 19,5 %;

– значительных изменений концентрации углекислого газа от антропометрических данных человека при различных нагрузках не наблюдалось (рисунок 3.18). Характер изменений объясняется особенностями физиологического строения дыхательной системы человека, так как у здорового человека с большей массой тела большее анатомическое мертвое пространство.

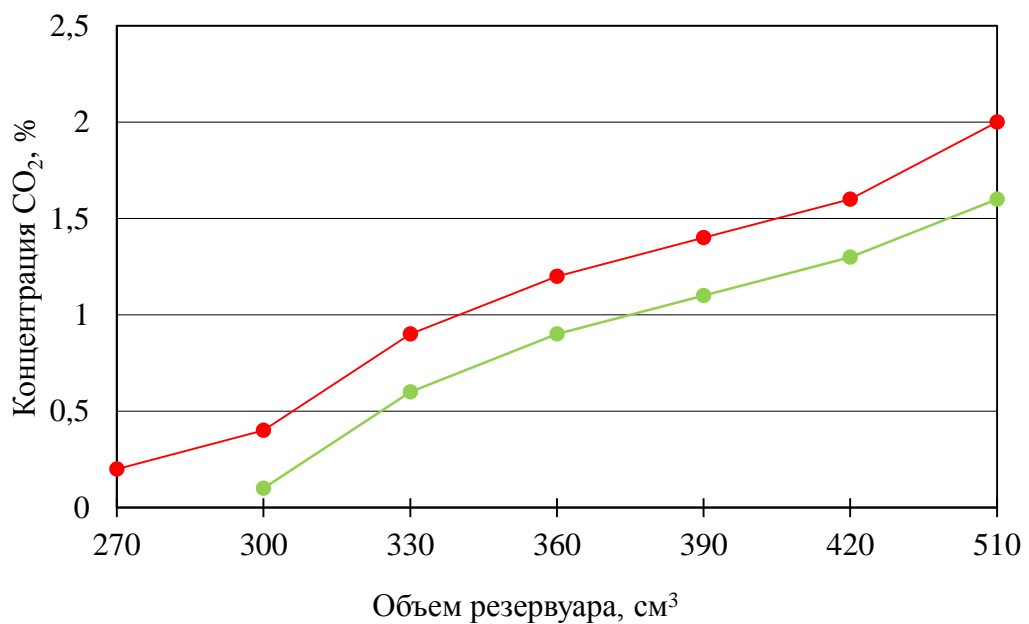


Рисунок 3.17 – Зависимость концентрации углекислого газа от объема резервуара отбора дыхательной смеси и дыхательной нагрузки

- – концентрация углекислого газа при средней нагрузке;
- – концентрация углекислого газа при легкой нагрузке

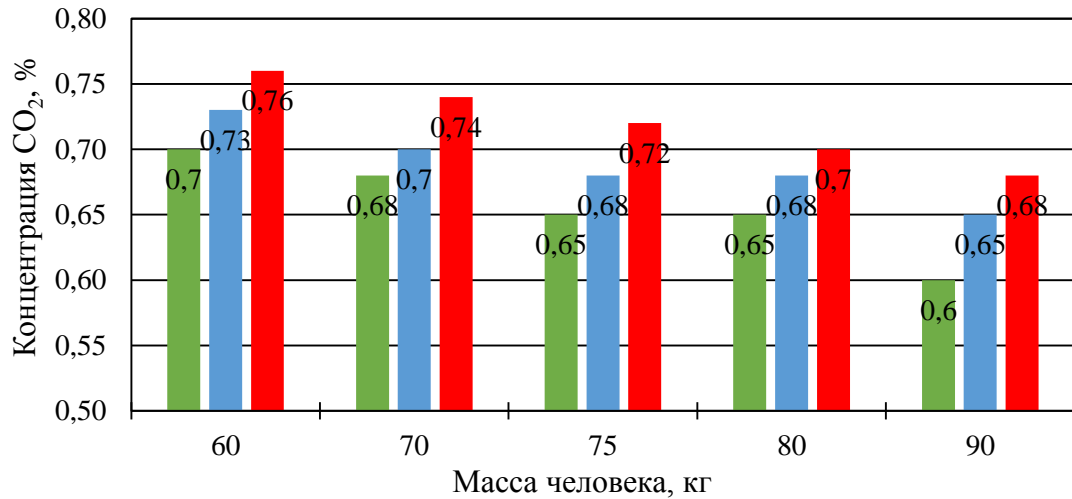


Рисунок 3.18 – Зависимость концентрации углекислого газа при использовании резервуара объемом 360 см<sup>3</sup> от антропометрических данных человека и дыхательной нагрузки: ■ – концентрация углекислого газа при легкой нагрузке; ■ – концентрация углекислого газа при средней нагрузке; ■ – концентрация углекислого газа при тяжелой нагрузке

Отмеченные различия в концентрации углекислого газа в силу своей незначительности не влияют на безопасность дыхания и эффективность применения резервуара отбора, что позволяет сделать вывод об универсальности одного размера резервуара.

Анализ результатов теоретического исследования применения резервуара для отбора части дыхательной смеси говорит о том, что увеличения сопротивления дыханию он не должен вызывать. Ожидается незначительное выравнивание кривой сопротивления дыханию в начальной стадии выдоха и вдоха, так как эластичное сопротивление резервуара меньше срабатывания легочного автомата и клапана выдоха. Проведенный эксперимент эти предположения полностью подтвердил.

Изменений температурно-влажностных характеристик дыхательного воздуха применение резервуара для отбора части дыхательной смеси, по оценкам испытуемых, не вызывает. Отмечается, что в начальный момент вдоха и выдоха при работе с мини-ДМ ощутимо (особенно при нагрузке) снижается сопротивление дыханию. Это явление отмечено испытуемыми как благоприятное.

При проведении эксперимента удалось достичь фиксированной нагрузки за счет хронометрического задания темпа работы на эргометре и внимательности участников испытаний (таблица 3.10).

Таблица 3.10– Показатели дыхательной нагрузки при испытаниях

Антропометрические данные (масса, кг / рост, см)	Легочная вентиляция в режиме отдыха, л/мин	Легочная вентиляция в режиме средней нагрузки, л/мин
60 / 164	13	29
70 / 172	13	30
75 / 175	14	32
80 / 180	14	33
90 / 185	15	35

Величины полученных экспериментальных результатов (рисунок 3.19) близки к расчетным показателям и равны, в среднем, для нагрузки средней тяжести 120 %, для режима отдыха – 200 %, по сравнению со временем защитного действия аппарата без резервуара отбора.

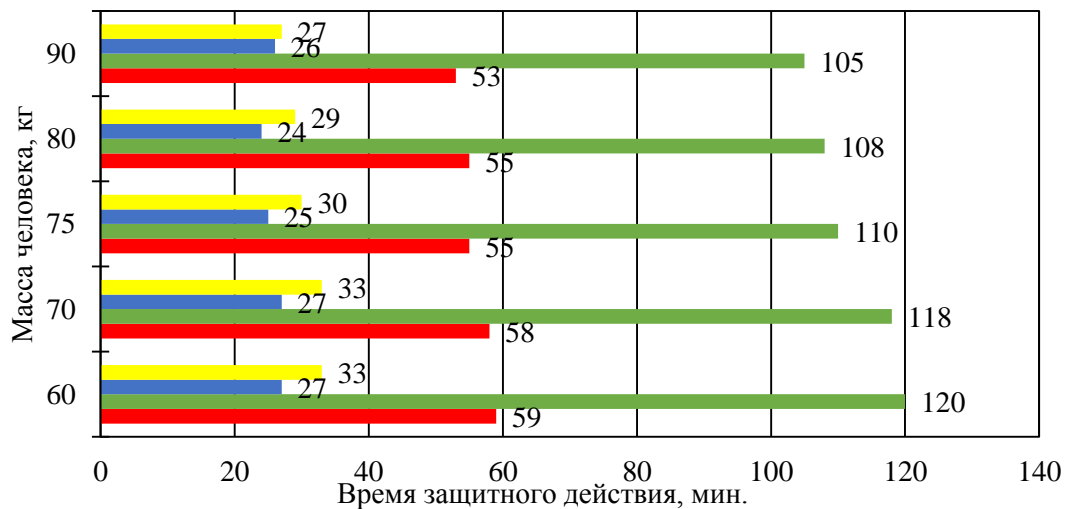


Рисунок 3.19 – Зависимости времени защитного действия при применении резервуара отбора от дыхательной нагрузки в сравнении со временем защитного действия аппарата без резервуара отбора:

- – в режиме отдыха без ДМ; ■ – в режиме отдыха с ДМ;
- – в режиме средней нагрузки без ДМ; ■ – в режиме средней нагрузки с ДМ

Результаты проведенной серии испытаний показали, что применение резервуара объемом 360 см<sup>3</sup> не оказывает влияние на самочувствие человека даже при длительной работе в аппарате. Это позволило провести испытания с резервуаром 500 см<sup>3</sup> (рисунок 3.20).

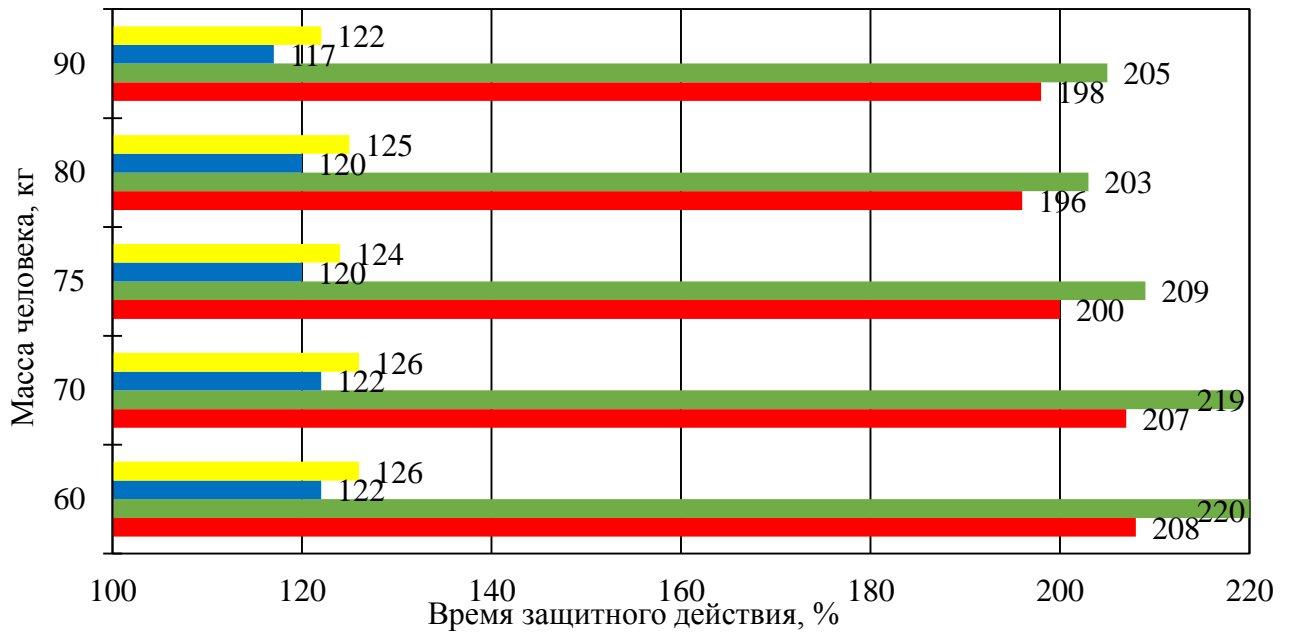


Рисунок 3.20 – Отношение времени защитного действия при применении резервуаров отбора объемом 360 и 500 см<sup>3</sup> ко времени защитного действия аппарата без резервуара отбора (100 %):

- – в режиме отдыха с ДМ 360 см<sup>3</sup>; ■ – в режиме отдыха с ДМ 500 см<sup>3</sup>;
- – в режиме средней нагрузки с ДМ 360 см<sup>3</sup>; ■ – в режиме средней нагрузки с ДМ 500 см<sup>3</sup>

Экономия дыхательной смеси составила 22÷24% в режиме нагрузки средней тяжести (легочная вентиляция 29÷35 л/мин.) и 105÷120% в режиме отдыха (легочная вентиляция 13–15 л/мин.).

Проведенная серия испытаний с резервуаром отбора объемом 500 см<sup>3</sup> показала, что самочувствие газодымозащитника не отличалось от состояния при работе без резервуара отбора, хотя концентрация углекислого газа в объеме резервуара составляла 1,6–1,9 %. Отмечается, что при увеличении дыхательной нагрузки происходило нарастание концентрации углекислого газа в резервуаре отбора. Это явление – следствие перемешивания первой выдохнутой порции с последующими, возникающего из-за несовершенства конструкции резервуара отбора. В ходе эксперимента было изменено расположение входного отверстия резервуара отбора, что значительно снизило концентрацию углекислого газа. Снижение подтвердило предположение о влиянии турбулентности при выдохе на появление повышенной концентрации углекислого газа в резервуаре отбора. Для устранения этого влияния

в проходном сечении был установлен успокоитель потока.

Применение успокоителя показало, что даже при небольших нагрузках происходило перемешивание воздуха в резервуаре. В среднем применение успокоителя позволило снизить концентрацию углекислого газа на 0,1% по сравнению с вариантом без успокоителя и устранить зависимость концентрации углекислого газа в резервуаре от нагрузки.

В результате исследований было принято, что оптимальными границами объема резервуара являются 320÷360 см<sup>3</sup> с применением успокоителя потока на входе в резервуар.

Изготовленные экспериментальные образцы резервуара отбора снабжены штуцером отбора проб газа и успокоителем потока. Величины их масс в зависимости от объема и варианта исполнения представлены в таблице 3.11, а соотношение масс основных узлов дыхательных различных моделей дыхательных аппаратов – в таблице 3.12.

Таблица 3.11 – Масса различных вариантов исполнения резервуара отбора

Модель маски	Объем резервуара, см <sup>3</sup>					
	260	320	360	420	500	600
ПМ-88 со стальным корпусом резервуара отбора	150	160	180	200	240	250
«Меди» с алюминиевым корпусом резервуара отбора	–	110	–	150	–	180

Таблица 3.12 – Масса основных составляющих резервуарных дыхательных аппаратов

Модель дыхательного аппарата и маски	Масса баллона (ов), кг	Масса аппарата без маски и баллона (ов), кг	Масса маски, кг
АИР-317 с маской ПМ-88	10,9	3,2	0,54
АИР-324 с маской ПМ-88	9,1	3,3	0,54
АСВ-2 с маской «Меди»	9,5	4	0,72
АСВ-2 со шлем-маской	9,5	4	0,33
Drager PA80 с маской «Меди»	10,4	3,3	0,72
«Airpak» с маской «Airpak»	8,1	3,6	0,46

Как видно из таблиц 3.11 и 3.12, увеличение массы аппарата при применении экспериментального образца резервуара отбора составляет 1÷2 %, а массы маски – 20÷28 %. Сопоставляя приращение времени защитного действия с увеличением массы

аппарата получаем, что удельное время защитного действия для всех моделей аппаратов увеличивается на  $17,5 \div 18,5$  %. При этом конструкция устройства позволяет выполнять все виды работ в непригодной для дыхания среде.

Как показали результаты теоретического и экспериментального исследований, возможно более экономно расходовать ресурс резервуарного аппарата за счет отбора части дыхательной смеси, не участвующей в легочном газообмене, и подаче ее на вдох. При использовании данного способа не наблюдалось ухудшения условий дыхания в аппарате (увеличения сопротивления дыханию, изменения температурно-влажностных характеристик дыхательного воздуха). Оптимальными границами объема резервуара являются  $320 \div 360$  см<sup>3</sup>.

Значительных изменений концентрации углекислого газа от антропометрических данных человека при различных нагрузках не наблюдалось. Характер изменений объясняется особенностями физиологического строения дыхательной системы человека и конструкции дыхательной маски. Различия в концентрации углекислого газа не влияют на безопасность работы в аппарате и эффективность применения резервуара отбора.

Фрагменты проведения эксперимента по исследованию увеличения ресурса средств индивидуальной защиты приведены на рисунке 3.21.

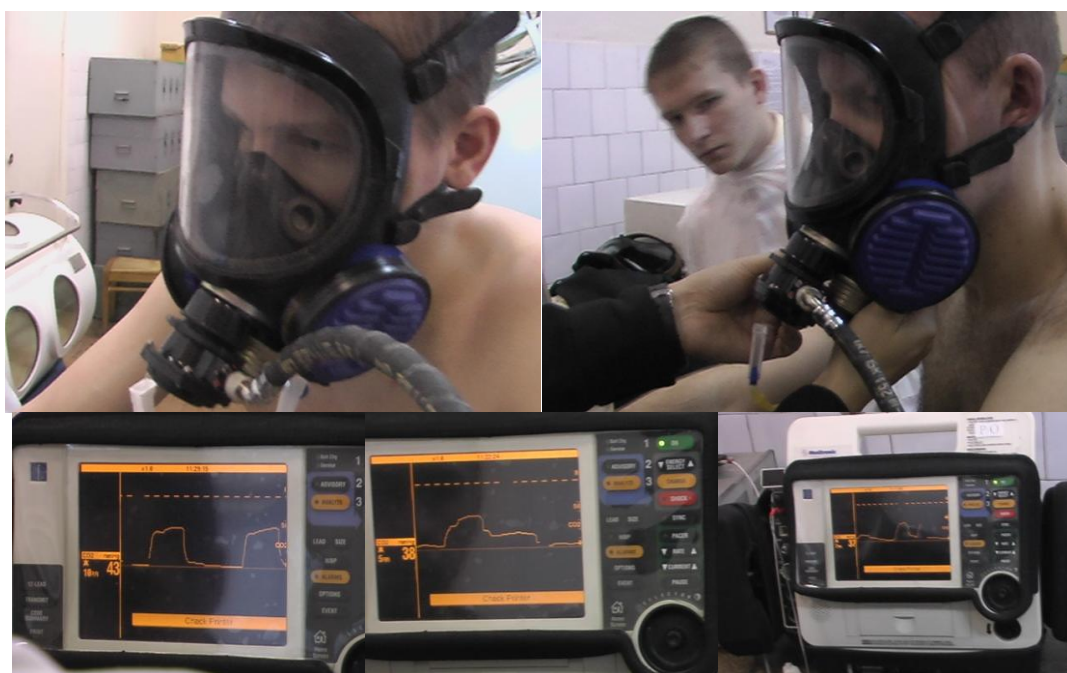


Рисунок 3.21 – Фрагменты проведения эксперимента по исследованию увеличения ресурса средств индивидуальной защиты



За счет применения резервуара отбора части дыхательной смеси объемом 360 см<sup>3</sup> время защитного действия резервуарного аппарата при работе газодымозащитников (массой от 60 до 90 кг) увеличилось на 17÷22 % в режиме нагрузки средней тяжести (легочная вентиляция 29÷35 л/мин) и на 96÷108 % в режиме отдыха (легочная вентиляция 13÷15 л/мин). Различия в расчетных и экспериментальных показателях объясняются тем, что математическая модель дыхания не может учесть особенности физиологии каждого отдельного человека. Кроме этого, некоторую погрешность вносили конструктивные особенности маски, регулировка дыхательного аппарата [185], [188].

Проведенная серия испытаний показала, что удельное время защитного действия для всех моделей аппаратов увеличивается при стандартных методах испытаний на 17,5–18,5 % (таблица 3.13, рисунок 3.22).

Таблица 3.13 – Величины удельного времени защитного действия при применении резервуара отбора для различных моделей резервуарных дыхательных аппаратов

Показатели	Модели дыхательных аппаратов				
	АСВ-2		АИР-324	АИР-317	Drager PA 80
Модель маски	Меди	Шлем-маска	ПМ-88	ПМ-88	Меди
Запас воздуха, л	1600	1600	2400	2100	1600
Стандартная комплектация					
Время защитного действия, мин.	60	60	70	70	60
Масса, кг	14,3	14	13,0	14,8	16,2
Удельное время защитного действия, мин/кг	<b>4,22</b>	<b>4,28</b>	<b>5,38</b>	<b>4,73</b>	<b>3,70</b>
Комплектация с применением резервуара отбора					
Время защитного действия, мин.	72	72	84	84	72
Масса, кг	14,5	14,2	13,2	15	16,4
Удельное время защитного действия, мин/кг	<b>4,97</b>	<b>5,07</b>	<b>6,36</b>	<b>5,6</b>	<b>4,39</b>

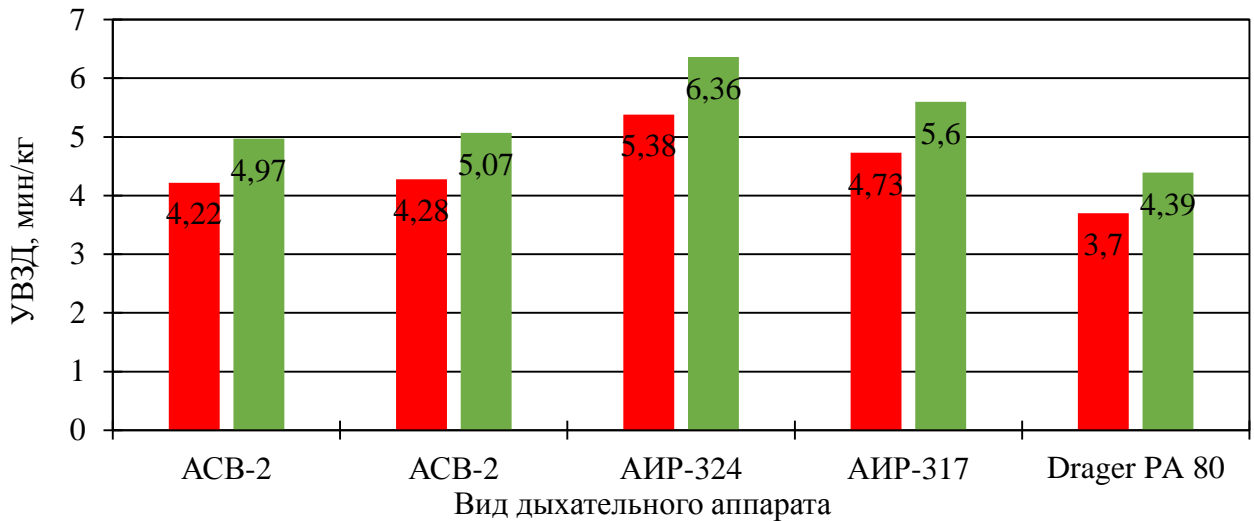


Рисунок 3.22 – Зависимость удельного времени защитного действия дыхательных аппаратов от применения резервуара отбора части дыхательной смеси:

■ – УВЗД, мин/кг; ■ – УВЗД с применением резервуара отбора, мин/кг.

Увеличить время защитного действия аппарата сжатого воздуха возможно еще за счет меньшего потребления воздуха (дыхание с задержками). В литературе по физиологии человека, например [202–209] встречаются результаты и выводы исследований дыхания человека с задержками между вдохом и выдохом. Это делалось для достижения лечебного эффекта при заболеваниях, а также для общего оздоровления организма. При этом снижалось общее количество потребляемого для дыхания воздуха, но изменений в физиологическом состоянии человека не наблюдалось.

Это послужило поводом к реализации подобного типа дыхания при использовании дыхательного аппарата со сжатым воздухом. Был проведен предварительный эксперимент, в котором сравнивались потребление воздуха для дыхания при обычном дыхании и дыхании с задержками. Параллельно контролировались частота пульса и дыхания, насыщение кислородом крови испытуемого. Задавались разные схемы дыхания – с двумя задержками (после вдоха и выдоха) и одной (после вдоха). Испытания проводились в теплокамере при температурах от 40 до 60 °С. Объем потребляемого воздуха замерялся по падению давления в баллонах аппарата на 50 атм. В программу эксперимента было включено устройство экономного рас-

ходования запаса воздуха, а также измерялось насыщение кислородом крови, отклонения которого не выходили за рамки физиологической нормы.

Значения физиологического состояния (пульса) испытуемого при нагрузке средней тяжести представлены на рисунке 3.23.

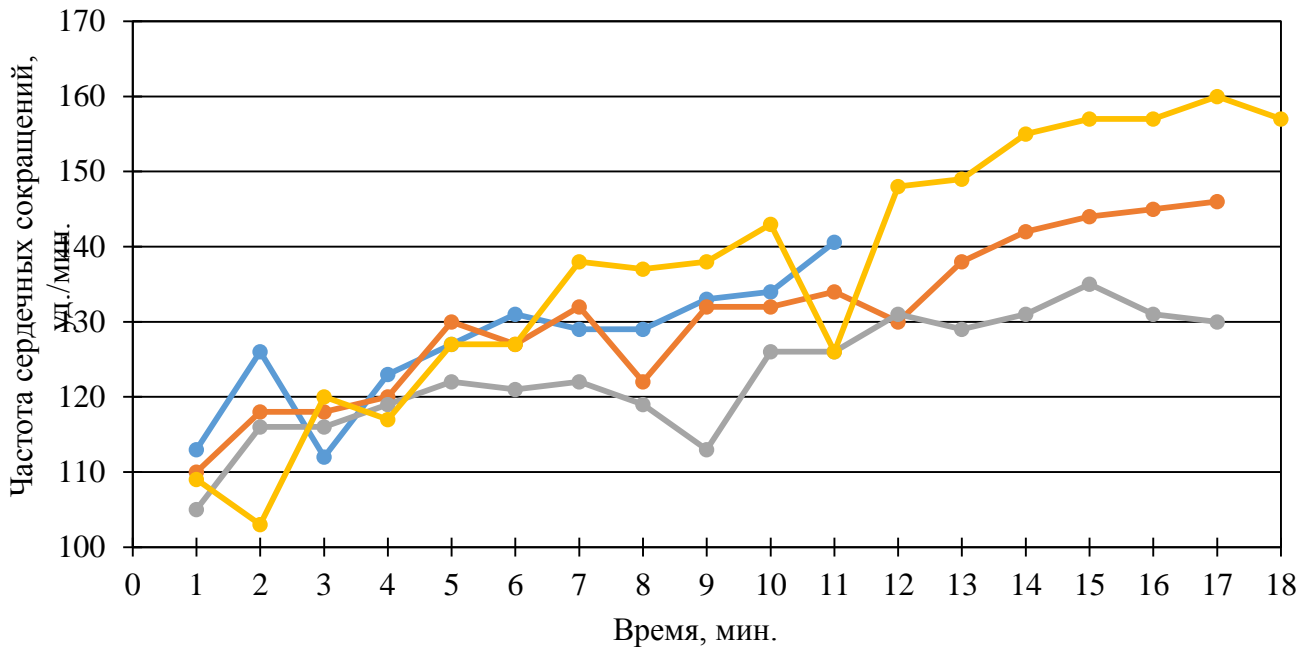


Рисунок 3.23 – Рост частоты сердечных сокращений и времени защитного действия при преодолении нагрузки средней тяжести и температуре в камере 40–50 °С:

- – обычное дыхание; ■ – дыхание с двумя задержками;
- – дыхание с одной задержкой; ■ – дыхание с одной задержкой и устройством

Результаты эксперимента показали потенциальную возможность увеличения времени защитного действия СИЗОД за счет психофизиологических резервов (возможностей) организма. Это стало первым шагом в развитии данного направления подготовки пожарных к работе в непригодной для дыхания среде.

Увеличение времени защитного действия СИЗОД, в том числе, за счет психофизиологических резервов (возможностей) организма, является важным для обеспечения непрерывного тушения пожаров объектов энергетики, удаленных от крупных пожарно-спасательных гарнизонов, так как состав сил, способных осуществлять тушение пожара, ограничен, особенно в начальной стадии. В настоящее время эти исследования продолжаются в Уральском институте ГПС МЧС России [210].

### **3.5 Разработка прототипа комплекса технических средств обеспечения работ в непригодной для дыхания среде при тушении пожаров в зданиях объектов энергетики**

Определяющим принципом выполнения работ по тушению пожара внутри зданий в условиях НДС является возможность бесперебойного обеспечения пожарных пригодным для дыхания воздухом. При этом требуется учитывать возможность задействования максимального числа пожарных для работы в НДС при привлечении личного состава по установленному рангу пожара.

На основе анализа крупных и сложных пожаров и различного вида техногенных аварий, сопровождающихся выбросом в окружающую среду аварийно-химически опасных веществ (АХОВ), были проанализированы технические средства для обеспечения работ в НДС и первоочередных аварийно-спасательных работ по оказанию помощи людям и проработана возможность совершенствования технических средств, обеспечивающих работу в НДС.

Выпускаемые и существующие специальные и аварийно-спасательные автомобили имеют достаточное оснащение для выполнения определенного круга задач по обеспечению работ в НДС. При небольшой частоте их использования, по сравнению с основными пожарными автомобилями, приходится содержать сменные экипажи (расчеты), помещения для размещения и нести другие эксплуатационные расходы. Если для мегаполисов такие затраты оправданы, то для большинства территориальных гарнизонов пожарной охраны содержать в режиме постоянной готовности несколько автомобилей для выполнения специальных работ при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ нецелесообразно. Это в полной мере относится и к объектам атомной энергетики.

С целью оптимизации схемы взаимодействия имеющихся на территории регионов сил и технических ресурсов необходима транспортно-энергетическая унификация подобной техники с сохранением широких возможностей изменения комплектации в зависимости от местных условий. Так, для обеспечения работ в НДС с

использованием ДАСВ в течение длительного времени, их эксплуатации, а также работы ручного и механизированного аварийно-спасательного инструмента, спасения и размещения спасаемых людей, проведения других видов аварийно-спасательных работ, целесообразно провести разработку и создание многофункционального комплекса обеспечения работ в непригодной для дыхания среде и первоочередных аварийно-спасательных работ (далее – комплекс).

Проблема работ в НДС при возникновении зон задымления (загазованности) большой площади и протяженности на объектах энергетики существует достаточно давно. На таких пожарах глубина зоны задымления сравнима со временем защитного действия находящихся на вооружении пожарных средств защиты дыхания, что не позволяет работать у очага пожара и обеспечивать безопасность, а в некоторых случаях и достигать его. Подобные ситуации возникают также при пожарах и техногенных авариях в метро, на судах, протяженных объектах со сложной планировкой, например, на Саяно-Шушенской ГЭС. Поэтому при эксплуатации ДАСВ возникает необходимость более частой зарядки воздухом, зачастую несколько раз при проведении работ во время одной аварии, пожара или спасательной операции.

Например, автомобиль-база газодымозащитной службы [211] оснащен компрессором производительностью 500 л/мин при давлении 330 бар и двух штуцерах раздачи воздуха, что не позволяет решить проблему своевременной зарядки воздушно-дыхательных аппаратов при проведении аварийно-спасательных работ на пожарах, авариях, чрезвычайных ситуациях, так как для зарядки одного семилитрового баллона ДАСВ уходит около 4 мин, что при крупных пожарах требует подвоза запаса снаряженных баллонов со стационарных баз газодымозащитной службы.

В крупных городах в качестве передвижного компрессора традиционно применяется унифицированная компрессорная станция типа УКС-400В-131 [212].

Установленный на автомобиле компрессор марки ВШВ-2.3/400 подтвердил заложенные заводом-изготовителем технические характеристики (надежность в работе, простота в эксплуатации и др.). Однако требования по качеству сжимаемого

воздуха, которые предъявляются к компрессорам, осуществляющим зарядку дыхательных аппаратов на сжатом воздухе, и возможности использования в условиях пожаров в него не были заложены. В связи с этим приобретение и использование УКС-400В-131 становится нецелесообразным по следующим причинам:

- отсутствует система контроля закачиваемого в баллоны воздуха;
- большой срок подготовки компрессора к работе (не менее 30 мин) при прибытии на место работы;
- большой вес (дополнительный двигатель для компрессора);
- невозможность подключения к электросети в случае выхода из строя двигателя компрессора;
- отсутствует возможность размещения и использования дополнительного оборудования (аппаратов на сжатом воздухе, пневмоинструмента и др.).

Большинство из используемых в настоящее время унифицированных компрессорных станций были получены в процессе сокращения из военно-воздушных сил в начале 1990-х гг., в связи с чем их ресурс близок к исчерпанию.

В настоящее время потребность подразделений МЧС России в каждом субъекте Российской Федерации численностью населения до 1,5 млн человек составляет не менее одного описываемого комплекса.

В имеющихся пожарных автомобилях газодымозащитной службы (АГ) и автомобилях-базах газодымозащитной службы (АБГ) заложены возможности обслуживания дыхательных аппаратов и их зарядки, но не определены количественные параметры, позволяющие обеспечивать бесперебойное снабжение на месте пожара или чрезвычайной ситуации достаточным количеством сжатого воздуха, пригодного для заправки ДАСВ.

Таким образом, определяющим принципом создания комплекса является возможность бесперебойного обеспечения пригодным для дыхания сжатым воздухом при задействовании максимального числа персонала для работы в НДС при тушении по максимально установленному рангу пожара. Для того чтобы определить потребность в сжатом воздухе при тушении пожаров, следует провести расчеты исходя из ситуации, когда все прибывшие к месту пожара пожарные, допущенные к

работе в НДС на протяжении пожара, работают в ней.

В таблице 3.14 представлены данные о времени, затрачиваемом на работу в НДС при тушении пожаров различной сложности и масштаба, а также необходимом запасе воздуха для дыхания пожарных. Наиболее вероятные случаи выделены в таблице серым цветом. При этом на практике встречаются случаи как длительной работы небольшого числа пожарных подразделений, так и относительно непродолжительной работы в НДС большого числа подразделений.

Таблица 3.14 – Данные о требуемом для дыхания пожарным объеме воздуха в непригодной для дыхания среде при тушении пожаров в зависимости от масштаба и сложности пожара

Ранг пожара	Минимальное число привлекаемых основных пожарных автомобилей, шт.	Количество пожарных одновременно привлекаемых к работе в НДС	Общее время работы в НДС, ч						
			0,5	1	2	3	4	5	6
			Объем воздуха, м <sup>3</sup>						
№1	2	6–8	3–4	6–8	12–16	18–24	24–36	30–40	36–48
№1бис	4	12–16	7–9	15–18	30–36	45–54	60–72	75–90	90–108
№2	8	25–30	12–15	25–30	50–60	75–90	100–120	125–150	150–180
№3	12	40–45	20–25	40–45	80–90	120–135	160–180	200–225	240–270
№4	16	50–60	25–30	50–60	100–120	150–180	200–240	250–300	300–360
№5	20	70–100	35–50	70–100	140–200	210–300	280–400	350–500	420–600

Прежде чем перейти к расходным характеристикам, следует остановиться на требуемых объемах сжатого воздуха. Здесь наиболее показательны следующие сочетания потребности в воздухе для дыхания:

- для тушения пожара по вызову № 1 – в течение 30 мин требуется 3–4 м<sup>3</sup>;
- по вызову № 1бис – в течение 1 часа требуется 15–36 м<sup>3</sup>;
- по вызову № 2 – в течение 2 часов требуется 50–60 м<sup>3</sup>;
- по вызову № 3 в течение 3 часов требуется 120–135 м<sup>3</sup>.

При более высоких рангах пожаров, принимающих затяжной характер, требуемый объем воздуха может достигать 1000 кубометров.

Следовательно, для хранения такого запаса воздуха требуется соответствующий высокопрочный резервуар, который заранее должен быть заполнен стационарным компрессором и доставлен к месту пожара. При этом нужно учитывать, что

давление в резервуаре должно значительно превышать заправочное давление ДАСВ (как правило, 300 атм), чтобы обеспечить перепуск. Поэтому реализовывать схему полного резервирования запаса сжатого воздуха и доставки его к месту пожара технически сложно. Кроме этого, требуется наличие стационарного компрессора, с учетом ограниченности воздуха в резервуаре.

Переходя к расчету расходных параметров, отметим, что он проводился исходя из различной напряженности работы при тушении пожаров и физиологической возможности человека работать продолжительное время при большой физической нагрузке (таблица 3.15).

Таблица 3.15 – Зависимость требуемой скорости зарядки воздухом дыхательных аппаратов при тушении пожаров от масштаба и сложности пожара

Ранг пожара	Минимальное число привлекаемых основных пожарных автомобилей, шт.	Количество пожарных одновременно привлекаемых к работе в НДС	Требуемая скорость зарядки ДАСВ при нагрузке, л/мин		
			средней тяжести (30 л/мин)	тяжелой (50 л/мин)	усредненная расчетная величина (40 л/мин)
№1	2	6–8	180–240	300–400	230–320
№1бис	5	15–18	450–540	750–900	600–720
№2	8	25–30	750–900	1250–1500	1000–1200
№3	12	40–45	1200–1350	2000–2250	1600–1800
№4	16	50–60	1500–1800	2500–3000	2000–2400
№5	20	70–100	2100–3000	3500–5000	2800–4000

Так как большинство субъектов Российской Федерации имеют численность населения около 1,5 млн человек, из них столиц субъектов с численностью около 0,5 млн человек, то в соответствующих территориальных гарнизонах пожарной охраны, осуществляющих тушение пожаров, устанавливается максимальный ранг пожара «вызов №3». Поэтому предлагается при выборе мощности комплекса ориентироваться на обеспечение одним комплексом потребностей большинства территориальных гарнизонов пожарной охраны. Для более крупных субъектов Российской Федерации, где крупные пожары случаются чаще, следует иметь 2-3 комплекса. При этом будет обеспечена заправка воздухом ДАСВ по окончании тушения на месте пожара, что повысит оперативную готовность пожарных подразделений.



Таким образом, требуется наличие мощной электросиловой установки (не менее 100 кВт) и воздушного компрессора с производительностью не менее 2 м<sup>3</sup>/мин. Важным условием является также наличие некоторого запаса сжатого воздуха, что позволит комплексу обеспечить выполнение возложенных задач непосредственно по приезду на место пожара, то есть до подачи воздуха от компрессора.

Работоспособность предложенного комплекса могут обеспечить три человека, обязанности которых по обслуживанию распределены следующим образом:

- командир-инструктор обеспечивает и организует работу аварийно-спасательного оборудования, средств связи и видеонаблюдения, оказывает помощь в ремонте и проверках СИЗОД и другой аварийно-спасательной техники и устройств;

- механик-водитель обеспечивает управление транспортным средством, приводом и обслуживанием электрогенератора;

- мастер компрессорного оборудования и эксплуатации СИЗОД обеспечивает работу компрессора, зарядку емкостей, ремонт и проверку СИЗОД и другой аварийно-спасательной техники и устройств.

При необходимости экипаж может быть дополнен спасателями или другими специалистами для выполнения поставленных перед комплексом задач. Комплекс конструктивно должен состоять из шасси, на котором установлены электрогенератор, компрессорная установка и рабочий отсек.

Кроме основной функции по заправке ДАСВ сжатым воздухом комплекс может обеспечивать освещение места пожара, а также поддерживать электропитание жилых домов, корпусов больниц и других социальных учреждений, не допускающих перебоев в электроснабжении. Также комплекс может использоваться в качестве составляющей при решении ряда задач гражданской обороны, таких как разведка зараженной или загрязненной местности, проведение аварийно-спасательных работ в условиях химического и бактериологического заражения, обеспечение жизнедеятельности и работоспособности спасателей и техники во время аварийно-

спасательных работ, осуществление работ по локализации, ликвидации химического и биологического загрязнения, подготовке специальных реагентов, проведению обеззараживания одежды и техники. Данные виды работ востребованы при ликвидации последствий пожаров и других чрезвычайных ситуациях на АЭС. При этом, когда комплекс не используется по прямому назначению, он может выполнять функцию обслуживания средств защиты органов дыхания и другой аварийно-спасательной техники (мобильная база), рассредоточенных на определенной территории или в населенном пункте.

В связи с тем, что эксплуатация регенеративных аппаратов строилась на стационарном принципе, они обслуживались на базах, оборудованных в соответствии с установленными правилами и имеющими 4–6 помещений с оборудованием в каждом пожарном подразделении. Это являлось оправданным решением, так как регенеративные аппараты закрепляются индивидуально и требуют после каждого использования разборки, мойки и сушки внутренних полостей, замены регенеративного патрона.

Обслуживание же ДАСВ может осуществляться по смешанному принципу, когда замена узлов, заправка и проверка проводятся сразу после использования, а ремонт, связанный с разборкой узлов – на базе. Это позволит сократить количество баз и централизовать обслуживание дыхательных аппаратов. Отпадает необходимость в закупке для каждой базы компрессора и другого оборудования, освобождаются помещения, появляется возможность перевода службы эксплуатации в режим постоянной готовности при том же количестве персонала.

Современные автомобили-базы газодымозащитной службы не позволяют решить проблему своевременной зарядки воздушно-дыхательных аппаратов при проведении аварийно-спасательных работ на пожарах. Поэтому при крупных пожарах требуется подвоз запаса снаряженных баллонов со стационарных баз газодымозащитной службы. В случае затяжного пожара производительности стационарных компрессоров также будет недостаточно для обеспечения непрерывной работы в непригодной для дыхания среде. В имеющихся пожарных автомобилях газодымозащитной службы заложены возможности обслуживания дыхательных аппаратов и

их переснаряжения, но не определены количественные параметры, позволяющие обеспечивать бесперебойное снабжение на месте пожара или чрезвычайной ситуации достаточным количеством сжатого воздуха, пригодного для заправки ДАСВ.

Таким образом, с целью обеспечения необходимых работ в НДС с использованием ДАСВ в течение длительного времени, их эксплуатации, а также работы ручного и механизированного аварийно-спасательного инструмента, спасения и размещения спасаемых людей, проведения других видов аварийно-спасательных работ в непригодной для дыхания среде и первоочередных аварийно-спасательных работ, проведена разработка требований для изготовления опытного образца автомобиля обеспечения работ в непригодной для дыхания среде при пожарах и авариях в энергетической отрасли марки АДК-100-2/400 (далее – АДК) (рисунок 3.24).

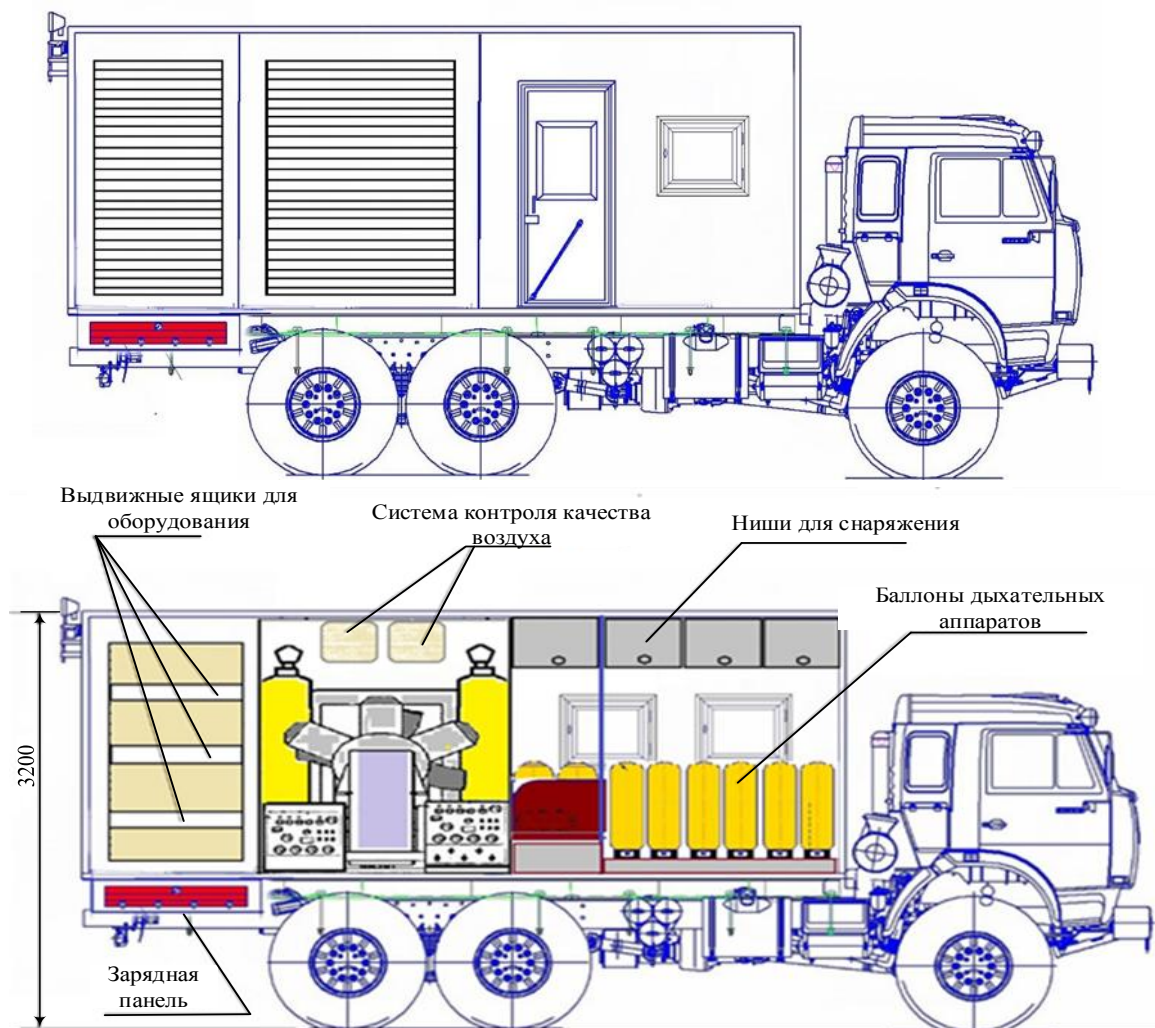


Рисунок 3.24 – Общий вид прототипа АДК-100-2/400

Определяющим принципом создания АДК является возможность бесперебойного обеспечения пригодным для дыхания сжатым воздухом максимального

числа персонала, привлеченного для работы в непригодной для дыхания среде при тушении по максимально установленному рангу пожара. При этом будет обеспечена заправка воздухом ДАСВ по окончании тушения на месте пожара, что также повысит оперативную готовность пожарных подразделений.

Таким образом, отличительной особенностью АДК от существующих специальных автомобилей, обеспечивающих деятельность газодымозащитной службы, является сочетание в одном автомобиле возможности выполнения основных функций обеспечения работ в непригодной для дыхания среде. Это достигается за счет сочетания на одном шасси мощной электросиловой установки, производительного воздушного компрессора, запаса сжатого воздуха, системы подготовки состава окружающего воздуха и постоянного контроля качества воздуха, заправляемого в баллоны дыхательных аппаратов, а также создания условий для персонала, обеспечивающего функционирование систем автомобиля (рисунок 3.25).

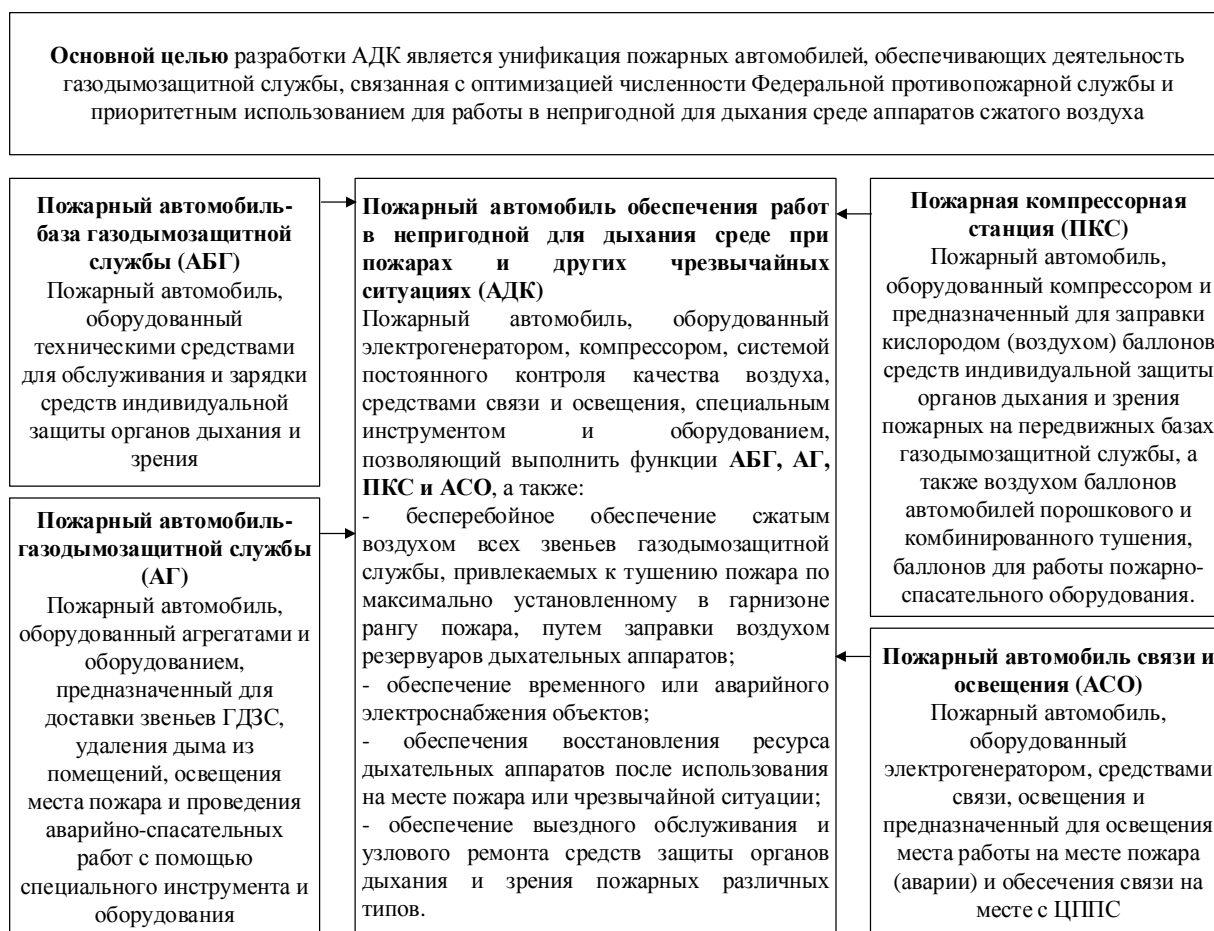


Рисунок 3.25 – Схема определения цели разработки АДК

Известными способами обеспечения жизнедеятельности в НДС являются фильтрация воздуха от вредных для человека веществ в тех случаях, когда содержание кислорода в воздухе достаточно для обеспечения дыхательной функции [213]. Наряду с зависимостью от содержания кислорода, к недостаткам фильтрующих средств защиты органов дыхания относятся необходимость подбора фильтра в зависимости от вредного вещества или их группы, а также зависимость времени защитного действия от концентрации фильтруемых веществ. При снижении концентрации кислорода обеспечение жизнедеятельности в НДС производится при помощи изолирующих средств защиты органов дыхания [213]. С точки зрения обеспечения безопасности человека, изолирующие средства защиты органов дыхания универсальны в любой среде и не зависят от состава окружающей среды. Наиболее распространенными видами изолирующих средств индивидуальной защиты органов дыхания являются дыхательные аппараты на сжатом воздухе, работающие по открытой схеме дыхания, когда воздух для дыхания поступает из емкости, где он находится в сжатом состоянии, а выдох производится в окружающую среду. Широкое распространение получили также изолирующие шланговые дыхательные аппараты. Они могут быть шланговые самовсасывающие, в которых воздух поступает по шлангу из чистой зоны за счет дыхательных усилий человека, и шланговые с принудительной подачей чистого воздуха с помощью воздуходувок, вентиляторов или от сети сжатого воздуха. Их общими недостатками являются ограниченное носимым резервом воздуха время защитного действия или ограниченный шлангом радиус действия, значительные габариты и масса.

Важным условием обеспечения безопасности работы в них является качество заряжаемого в емкость аппарата воздуха. Нормативно установлено допустимое содержание различных газов и примесей в заряжаемом воздухе. Контроль качества окружающего воздуха производится периодически в местах установки компрессоров, осуществляющих заправку емкостей дыхательных аппаратов, и предполагает собой стационарный способ зарядки, являющийся преобладающим.

В воздухе городов, вблизи оживленных автомобильных магистралей и промышленных зонах содержание вредных веществ в большинстве случаев превышает

допустимые пределы для зарядки дыхательных аппаратов, в первую очередь, по окислам азота, что требует предварительной очистки воздуха перед зарядкой. При образовании в результате техногенных аварий, катастроф и пожаров больших по протяженности зон НДС (до нескольких километров), как показывает практика, времени защитного действия изолирующих средств защиты органов дыхания бывает недостаточно для преодоления такой зоны, работы в очаге пожара и возвращения обратно.

Решение данной проблемы можно осуществить за счет выдвижения к непригодной для дыхания среде (по возможности ближе к месту работ) мобильного комплекса обеспечения работ в НДС, внутри которого можно сменить или заправить дыхательный аппарат, отдохнуть, принять пострадавших и оказать им первую помощь. В этом случае будет тратиться меньше сил и времени на преодоление расстояний, что будет способствовать обеспечению длительной работы в зонах НДС большой протяженности в средствах защиты органов дыхания при их массовом применении, а также может быть осуществлена оптимизация их эксплуатации, в том числе, обеспечение зарядки дыхательных аппаратов сжатым воздухом непосредственно возле зоны НДС (рисунок 3.26).

В состав мобильного комплекса входят (рисунок 3.26) компрессор высокого давления 1, приводимый от двигателя шасси 2 через коробку отбора мощности 3 и электрогенератор 4, система фильтрации 5, система газового анализа 6 с монитором 7, система распределения воздуха 8, ресиверы для сжатого воздуха 9, рабочий отсек 10.

В целях обеспечения очистки окружающего комплекс воздуха компрессор, системы фильтрации и газового анализа объединены таким образом (см. рисунок 3.26), что обеспечивается постоянный контроль газового состава воздуха при участии оператора 11, находящегося внутри рабочего отсека. Это происходит следующим образом. Газовый состав воздуха окружающей комплекс среды 12 постоянно анализируется при помощи системы газового анализа 6, которая параллельно с передачей данных на регистратор 13 отображает на монитор 7 данные о газовом составе окружающего комплекс воздуха 12 и воздуха в рабочем отсеке 10.

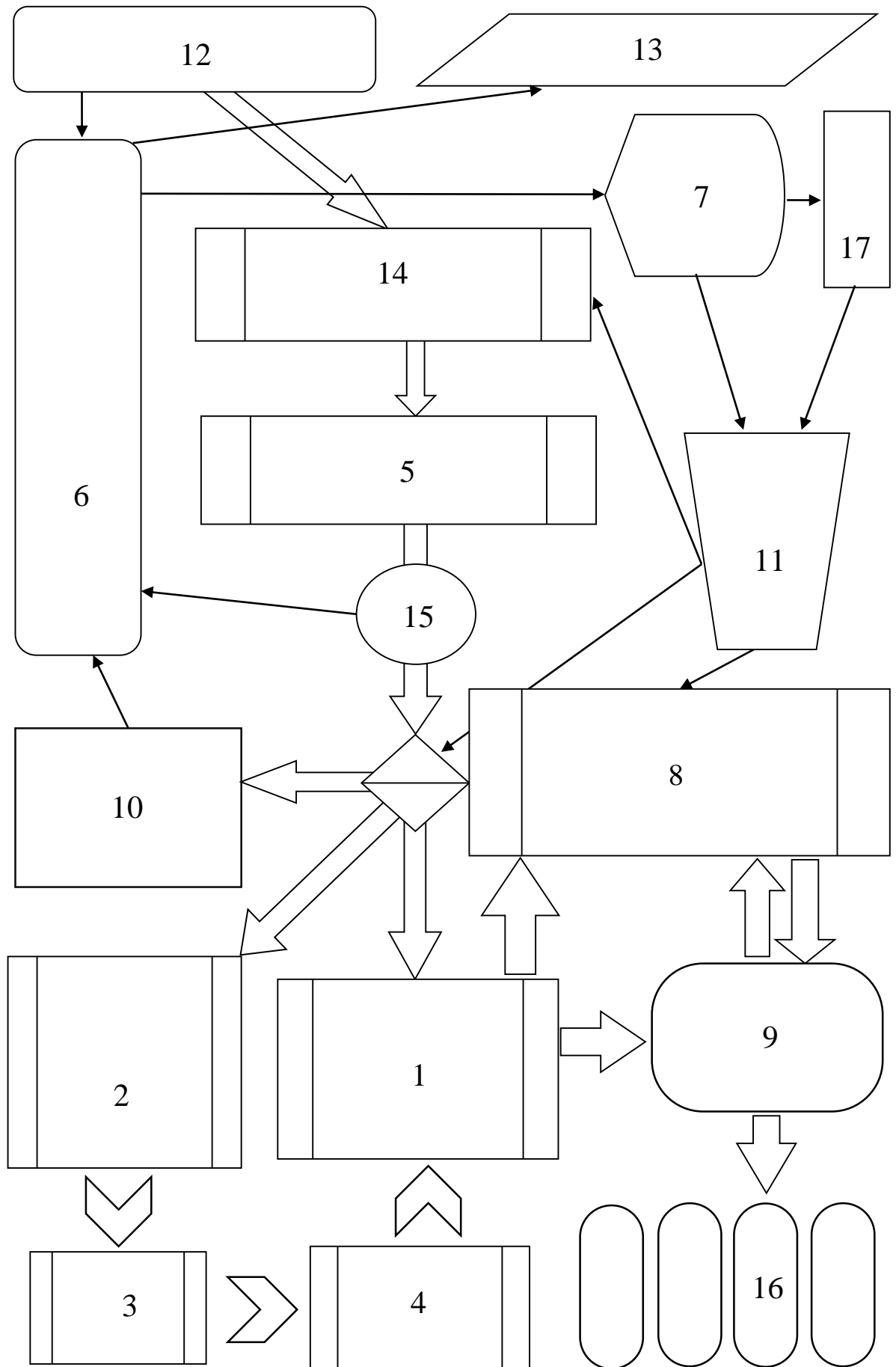


Рисунок 3.26 – Блок-схема обеспечения очистки воздуха в мобильном комплексе при работе в НДС

При необходимости очистки воздуха его забор осуществляется воздуходувкой 14 и подается для очистки в систему фильтрации 5. Далее через пробоотборный узел 15 производится контроль очистки воздуха системой газового анализа 6. После этого воздух может подаваться посредством системы распределения воздуха 8, управляемой оператором 11 в компрессор 1 с последующей подачей сжатого воздуха для заправки ресиверов для сжатого воздуха 9 и в последующем дыхательных аппаратов 16, в двигатель 2 и внутрь рабочего отсека 10. В случае снижения содержания кислорода ниже установленного предела или повышения концентрации вредных веществ, наряду с выводом сигнала на монитор 7, срабатывает звуко-световой сигнализатор 17. В случае перебоев в работе системы очистки воздуха, а также по прибытии к месту пожара, оператор задействует резерв воздуха из ресиверов для сжатого воздуха 9.

Для обеспечения мобильности комплекса обеспечения работ в непригодной для дыхания среде он может быть оборудован на шасси грузового автомобиля повышенной проходимости. Кроме основной функции по заправке ДАСВ сжатым воздухом АДК может обеспечивать освещение места пожара, а также поддерживать электропитание объектов, не допускающих перебоев в электроснабжении, таких как АЭС.

Реализация концепции АДК на практике позволит значительно повысить возможности тушения пожаров в условиях задымления и ликвидации аварий в условиях НДС на объектах энергетики.



## ГЛАВА 4 ОСНОВЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ В НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ИХ РАЗВИТИЯ

### 4.1 Научные основы и моделирование жизнеобеспечения персонала в зданиях объекта энергетики при воздействии опасных факторов пожара

Основным нормативным правовым актом, определяющим общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в Российской Федерации, и регулирующим отношения в этой сфере между органами государственной власти, органами местного самоуправления, учреждениями, организациями, крестьянскими (фермерскими) хозяйствами, иными юридическими лицами независимо от их организационно-правовых форм и форм собственности, а также между общественными объединениями, должностными лицами, гражданами Российской Федерации, иностранными гражданами, лицами без гражданства, является Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. №69-ФЗ «О пожарной безопасности» (далее – ФЗ №69-ФЗ «О ПБ») [214]. В соответствии с этим законом основными элементами системы обеспечения пожарной безопасности являются органы государственной власти, органы местного самоуправления, организации, граждане, принимающие участие в обеспечении пожарной безопасности.

Конкретизация технических аспектов пожарной безопасности, в том числе вопросов обеспечения безопасности людей при пожарах, осуществляется в соответствии с требованиями Федерального закона от 22 июля 2008 года №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее – ФЗ №123-ФЗ «ТРОТПБ») [17]. Этот закон принят в целях защиты жизни, здоровья, имущества граждан и юридических лиц, государственного и муниципального имущества от пожаров, определяет основные положения технического регулирования в области пожарной безопасности, устанавливает общие требования пожарной безопасности к объектам защиты (продукции).

Данный документ законодательно определяет основные подходы и наборы

технических средств, призванных обеспечить сохранение жизни и здоровья людей в случае угрозы им ОФП [39].

Если система обеспечения пожарной безопасности объекта защиты не выполнила полностью свои функции, то защита людей и имущества от воздействия ОФП и (или) ограничение последствий их воздействия обеспечивается применением первичных средств пожаротушения и (или) организацией деятельности подразделений пожарной охраны по тушению пожаров. Таким образом, сложившаяся система жизнеобеспечения человека при пожаре подразумевает совокупность своевременной эвакуации людей в безопасные зоны с последующим прибытием пожарных подразделений для тушения пожара. В то же время временные аспекты данных процессов накладываются друг на друга и порождают ряд ситуаций, которые могут потребовать дальнейшего нормативно-правового регулирования [40], [215].

Своевременная эвакуация людей в случае возникновения пожара на объекте также имеет несколько аспектов. Условия эвакуации и меры по ее обеспечению до наступления действия на человека ОФП рассмотрены в нормативных документах по пожарной безопасности достаточно подробно. В подавляющем большинстве случаев успех эвакуации зависит от качества выполнения обеспечивающих ее мер и своевременности действий как самих эвакуирующихся, так и персонала (при его наличии). При этом следует отметить, что нет прямого требования к гражданину и работнику об эвакуации при поступлении сигнала системы оповещения о пожаре. Это подразумевается в рамках обучения требованиям пожарной безопасности.

Еще менее отрегулированы действия персонала объектов, который в условиях пожара обязан выполнять определенные должностные обязанности. Это касается ряда объектов социальной сферы, где персонал обязан провести эвакуацию людей, и ряда объектов промышленности, технологический процесс которых не может быть остановлен по условиям безопасности, либо объектов энергетики, которые обеспечивают благополучие больших масс людей.

Вполне закономерно, что в этих случаях следует предусмотреть защиту персонала, в первую очередь, от дыма, как наиболее быстро распространяющегося ОФП. Если рабочее место локально, то система противодымной защиты здания,

сооружения или строения может обеспечивать защиту людей в безопасных зонах в течение всего времени развития и тушения пожара посредством удаления продуктов горения и термического разложения и (или) предотвращения их распространения. Если персонал должен организовывать эвакуацию, либо выполнять технологические операции, обеспечивающие безопасность объекта, в разных местах не представляется возможным предотвратить воздействие на него ОФП размещением в безопасной зоне. В этом случае требуется применять другие средства защиты, чаще всего, индивидуальные. Действия персонала в условиях воздействия ОФП, по сути, являются риском, который выходит за рамки, установленные законодательством в области пожарной безопасности.

В этих случаях предусматриваются меры по обучению персонала действиям при пожаре и по социальной защите работников, компенсирующие их работу в условиях повышенного риска. При этом не установлено соответствие уровня действий персонала при пожаре, его степени готовности, экипированности и технической оснащенности. Данное обстоятельство также может быть учтено при расчетах приемлемости риска.

В настоящее время отдельными отраслями, эксплуатирующими объекты повышенной опасности, предпринимаются меры по упорядочиванию действий персонала в условиях воздействия ОФП. Для этого на объектах создаются добровольные пожарные дружины (с техникой и без нее), разрабатываются инструкции о порядке действий на случай обнаружения пожара, проводятся тренировки и учения. Согласно [216] работники при обнаружении пожара должны действовать по утвержденной на предприятии инструкции.

Во всех организациях обучение мерам пожарной безопасности проводится их администрацией (собственниками) [214]. При этом отмечается, что все работники организаций должны допускаться к работе только после прохождения противопожарного инструктажа, а при изменении специфики работы проходить дополнительное обучение по предупреждению и тушению возможных пожаров в порядке, установленном руководителем.

Для оценки возможностей действий персонала по тушению пожара, в соответствии с требованиями законодательства Российской Федерации, в помещении щита управления АЭС произведен расчет тушения очага пожара первичными средствами пожаротушения. Полученные данные по расходу ОТВ и надежности тушения очага внутренним противопожарным водопроводом позволят объективно планировать действия по тушению пожаров оперативным персоналом АЭС до прибытия пожарных подразделений [217].

В качестве объекта исследования выбрано помещение блочного щита управления (далее – БЩУ) АЭС, с реактором типа РБМК–1000 и размерами 84×13×6 м (рисунок 4.1).



а



б

Рисунок 4.1 – Общий вид блочного щита управления АЭС:

а) вид на оперативные панели; б) конфигурация блочного щита управления АЭС

Для определения развития ОФП в типовых помещениях АЭС использовался программный комплекс «Fire Dynamics Simulator» (FDS) (Version 6), соответствующий действующей методике расчета величин пожарного риска.

Расчет динамики развития пожара в помещении БЩУ АЭС показал следующее:

1. Потеря видимости (менее 20 м) в помещении БЩУ наступает через 3 мин с момента возникновения пожара (рисунок 4.2).

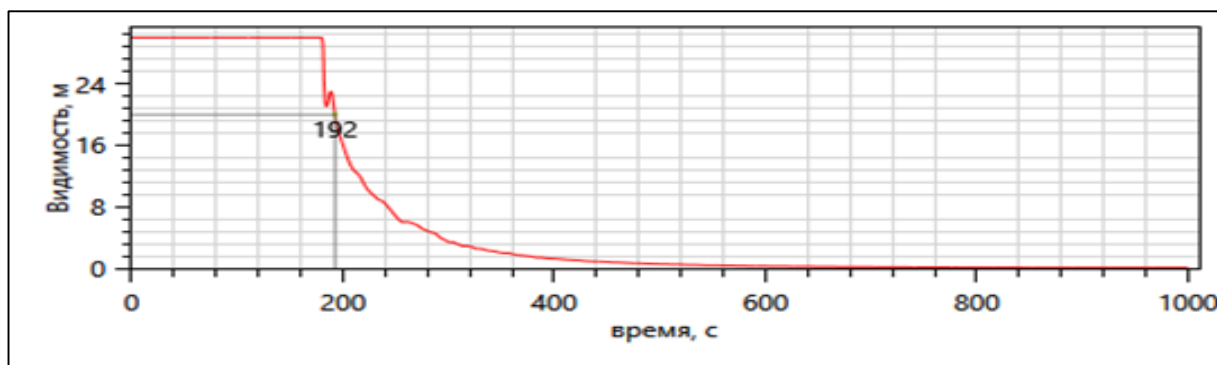


Рисунок 4.2 – Критический показатель по потере видимости

Прибытие к этому времени пожарных подразделений по охране АЭС и начало их действий по тушению пожара при данном сценарии его развития маловероятно. Тушение очага пожара в начальной стадии развития целесообразно проводить оперативному персоналу имеющимся на БЦУ первичными средствами пожаротушения.

2. Динамика развития пожара на БЦУ показывает, что уровень содержания вредных и токсичных веществ в воздухе через 5 мин достигнет критических значений (рисунок 4.3).

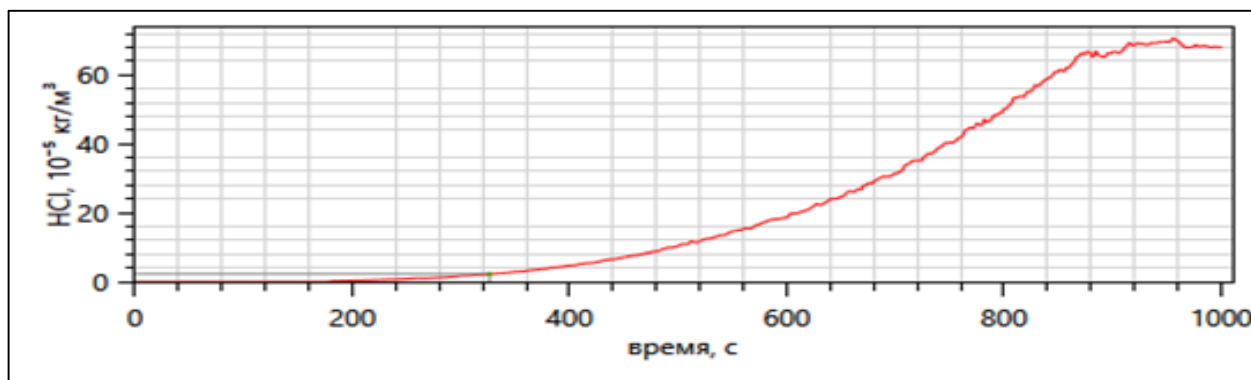


Рисунок 4.3 – Рост уровня содержания хлороводорода в воздухе помещения блочного щита управления АЭС

В этом случае оперативный персонал должен использовать дыхательный аппарат со сжатым воздухом для защиты органов дыхания и зрения при выполнении работ по контролю состояния реакторной установки.

3. Уровень абсолютной температуры на уровне рабочей зоны в помещении БЦУ уже через 5,5 мин после начала горения приблизится к отметке 70 °С и в дальнейшем будет неуклонно расти. Через 9 мин он составит порядка 140–160 °С (рисунок 4.4).

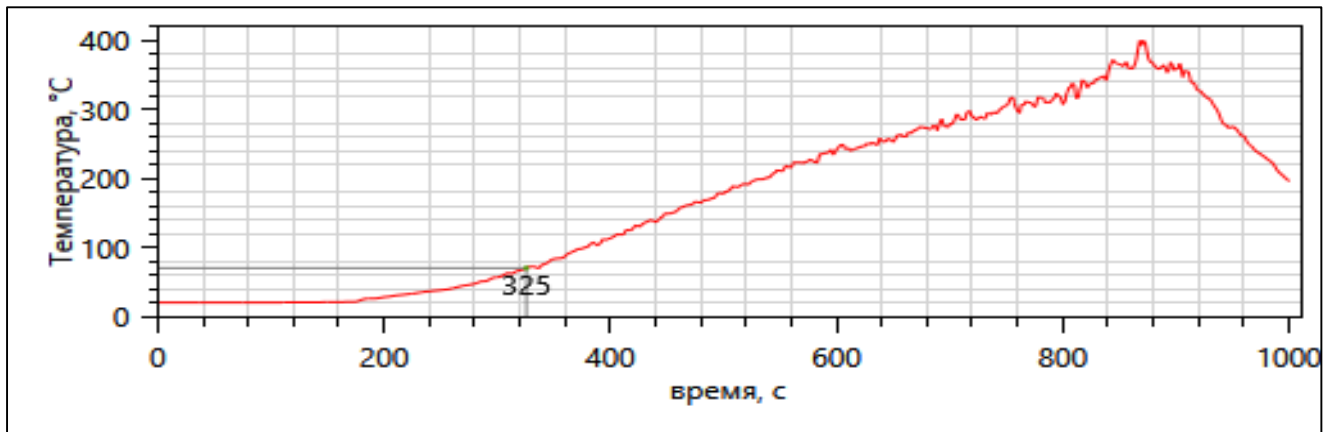


Рисунок 4.4 – Рост абсолютной температуры на уровне рабочей зоны в помещении БЩУ АЭС

В связи с этим оперативный персонал должен применять средства защиты тела человека от воздействия высокой температуры, искр, теплового потока, открытого пламени и раскаленных предметов.

4. В случае, если принятые оперативным персоналом АЭС мероприятия по тушению пожара не привели к успеху, то возможно дальнейшее распространение пожара по кабелям и электронному оборудованию БЩУ. Также возможен выход из строя элементов контрольно-измерительных приборов при достижении уровня их расположения прогретым слоем продуктов горения. Дальнейшее развитие пожара в условиях отсутствия видимости приведет к прогреву и общему воспламенению горючих материалов на БЩУ уже через 900–1200 с.

5. При дальнейшем развитии пожара на БЩУ прибывающим ППО по охране АЭС необходимо принимать меры по защите оперативного персонала, осуществляющего контроль и управление реакторной установкой, от воздействия ОФП. При невозможности выполнять дальнейшие работы на БЩУ необходимо использовать резервный щит управления.

Также рассмотрен прогноз развития ОФП в помещении машинного зала АЭС. Повышенную пожарную опасность в данном помещении создают:

- смазочные масла, обращающиеся в производстве при температурах выше 200 °C, превышающей их температуру самовоспламенения;
- электрические кабели, объединенные в крупные потоки и имеющие горючую изоляцию;

– водород, используемый в системе охлаждения генератора.

Пожарная опасность турбогенератора обусловлена высоким давлением масла в системах регулирования, повышенной температурой паропроводов, корпуса и паровых каналов. Возгорание масла происходит вследствие его разлива или разбрызгивания на горячие участки паропроводов при разрушении или ослаблении из-за вибрации масляных трубопроводов. При возгорании масла, вытекающего из поврежденных маслосистем, обстановка осложняется проникновением его через неплотности технологических проемов на нижерасположенные отметки. Образующиеся горячие факелы и мощные конвективные тепловые потоки быстро нагревают элементы металлических ферм до критической температуры, что приводит к обрушению строительных конструкций. Падающие фермы и плиты покрытий еще больше разрушают масляные коммуникации.

Развитие пожаров в машинных залах электростанций в большей степени зависит от характера возникновения горения (взрыв, воспламенение паров масла, замыкание электропроводки и др.). Интенсивное развитие горения веществ и материалов возможно при взрывах водорода, паров в масляных емкостях, при разрыве маслопроводов с разливом масла. Одновременно с горением возникает большое количество очаговых повреждений систем соседних генераторов и турбин. Кроме этого, выделяется большое количество дыма и помещения быстро задымляются, что часто не позволяет оперативному персоналу произвести все необходимые операции по инструкции и обеспечить постоянный контроль работы других агрегатов. Сложность обстановки на пожаре при горении масла заключается в том, что емкости маслосистем, маслопроводы, насосы расположены на нулевой отметке, где и происходит горение растекающегося масла, тогда как генераторы, турбины со всеми приборами контроля и управления располагаются на отметках 8–10 м, то есть в зоне действия дыма и пламени. Максимальная скорость роста площади горения на имевших место пожарах достигала  $25 \text{ м}^2/\text{мин}$ .

В качестве примера пожара в помещении машинного зала можно рассмотреть инцидент, произошедший на Новосибирской ТЭЦ (рисунок 4.5), связанный с разрывом маслопровода у турбины блока мощностью 60 МВт, находившегося под нагрузкой [218].



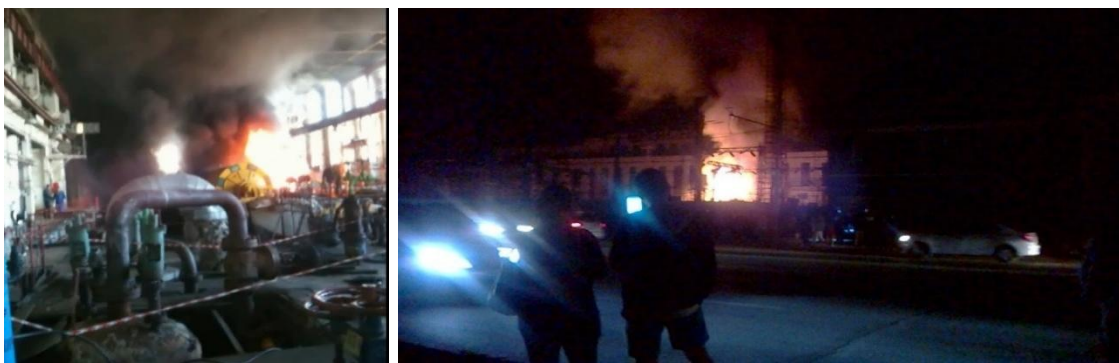


Рисунок 4.5 – Пожар на Новосибирской ТЭЦ

Перекрыть маслопроводы удалось на четвертой минуте, однако масло продолжало вытекать еще 20 мин, так как вал генератора (после его отключения) вращался по инерции, а вместе с этим работал и маслонасос. В результате, из системы вытекло несколько тонн масла, образовав в центре зала очаг горения площадью 150 м<sup>2</sup>. Растекающееся масло попало на паропровод и воспламенилось. Горящее масло через неплотности и отверстия в перекрытие проникло в кабельные каналы. Помещение машинного зала было задымлено по истечении 5 мин, а через 8–10 мин от действия пламени струи горящего масла произошло частичное обрушение покрытия. На 20–25 мин горение по кабелям распространилось в полуэтаж, котельную и через незащищенные отверстия в перекрытии на блочный пульт управления. Создалась угроза распространения горения в кабельные тоннели и другие помещения станции.

В качестве другого примера можно привести пожар, произошедший в 2015 г. в машинном зале Василеостровской ТЭЦ (г. Санкт-Петербург) (рисунок 4.6) [219].

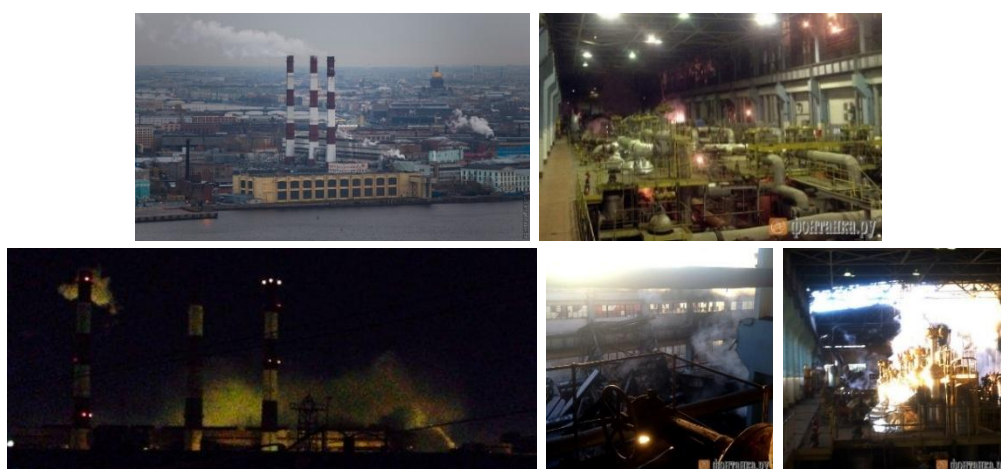


Рисунок 4.6 – Пожар в машинном зале Василеостровской ТЭЦ  
(г. Санкт-Петербург)



Пожар развивался столь стремительно, что было принято решение об отключении всей ТЭЦ, включая подачу газа. В первые минуты пожара столб огня достигал порядка 30 м, однако соседние турбины не пострадали. Огонь бушевал в машинном зале котлотурбинного цеха на площади 400 м<sup>2</sup>. На момент возгорания в помещении машинного зала находились приблизительно 100 человек. В машинном зале частично обрушилась крыша на площади в 200 м<sup>2</sup>. Существовала вероятность разрушения стен здания. Вероятной причиной пожара явилось возгорание машинного масла под турбиной. Для ликвидации пожара привлекалось 154 человека личного состава и 42 единицы техники МЧС России.

В качестве объекта исследования (для оценки развития ОФП) выбрано помещение машинного зала АЭС с реактором типа РБМК-1000. На рассматриваемой АЭС эксплуатируются три энергоблока, размещенные в общем машинном зале длиной 654 м, шириной 51 м и высотой около 33 м. Общий вид машинного зала приведен на рисунке 4.7.



а



б

Рисунок 4.7 – Общий вид машинного зала АЭС с реактором типа РБМК-1000:

а) машинный зал АЭС; б) турбогенератор АЭС на отметке 10 м

Наиболее вероятным источником пожара является возгорание трансформаторного масла вследствие его попадания на раскаленные поверхности технологического оборудования при разгерметизации трубопроводов под давлением.

Для определения развития ОФП в машинном зале АЭС, как и в случае моделирования пожара на БЦУ АЭС использовался программный комплекс «Fire Dynamics Simulator» (FDS) (Version 6).

Проведенные расчеты динамики развития возможного пожара в помещении машинного зала АЭС показали следующее.

1. Потеря видимости (менее 20 м) в помещении машинного зала наступает менее чем через 1 мин. с момента возникновения пожара (рисунок 4.8). Прибытие к этому времени подразделений ФПС ГПС по охране АЭС и начало успешных действий по тушению пожара при данных сценариях развития пожара маловероятно. Эвакуацию персонала, технологические переключения и сбор информации о пожаре целесообразно проводить оперативному персоналу машинного зала с применением первичных средств пожаротушения (внутренний противопожарный водопровод), уделив особое внимание технике безопасности при выполнении соответствующих работ.

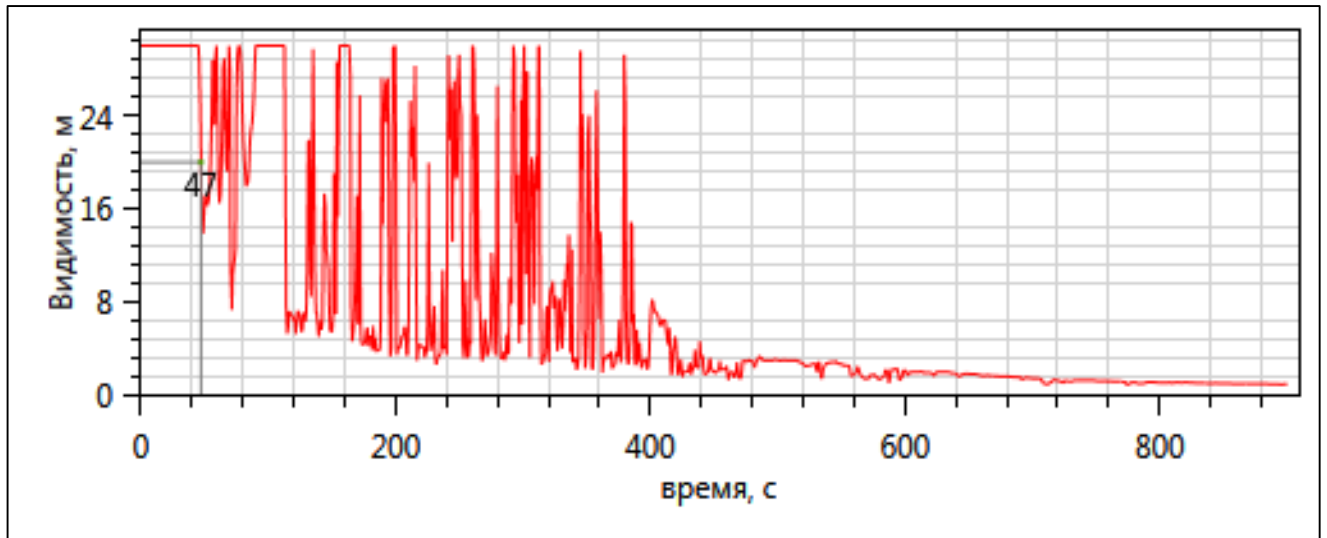


Рисунок 4.8 – Критический показатель по потере видимости на уровне рабочей зоны помещения машинного зала АЭС

2. Динамика развития пожара в помещении машинного зала показывает, что уровень абсолютной температуры на уровне рабочей зоны уже через 2 мин. с момента возникновения горения превышает  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  и в дальнейшем будет неуклонно расти. Через 5 мин температура составит около  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а через 10 мин ее значение превысит  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 4.9). В этой связи оперативный персонал должен применять средства защиты тела человека от воздействия высокой температуры, искр, теплового потока, открытого пламени и раскаленных предметов.

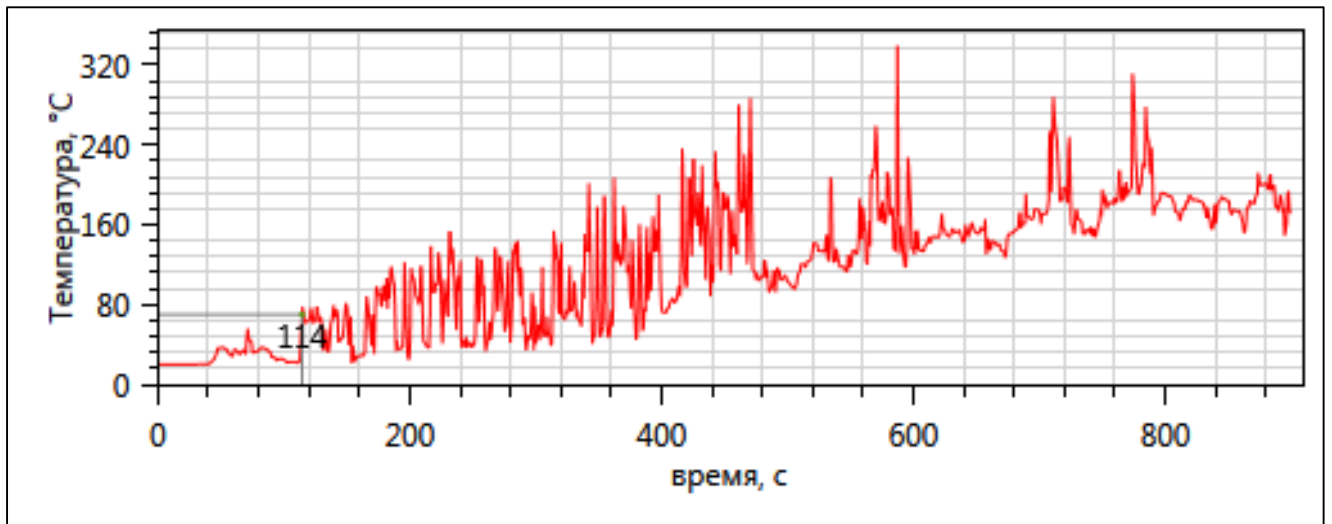


Рисунок 4.9 – Временная граница наступления критического показателя абсолютной температуры на уровне рабочей зоны помещения машинного зала АЭС

3. Через 3 минуты с момента возникновения пожара содержание кислорода в воздухе уменьшится до критического значения (рисунок 4.10). Для выполнения дальнейших работ оперативному персоналу необходимо применение дыхательных аппаратов со сжатым воздухом.

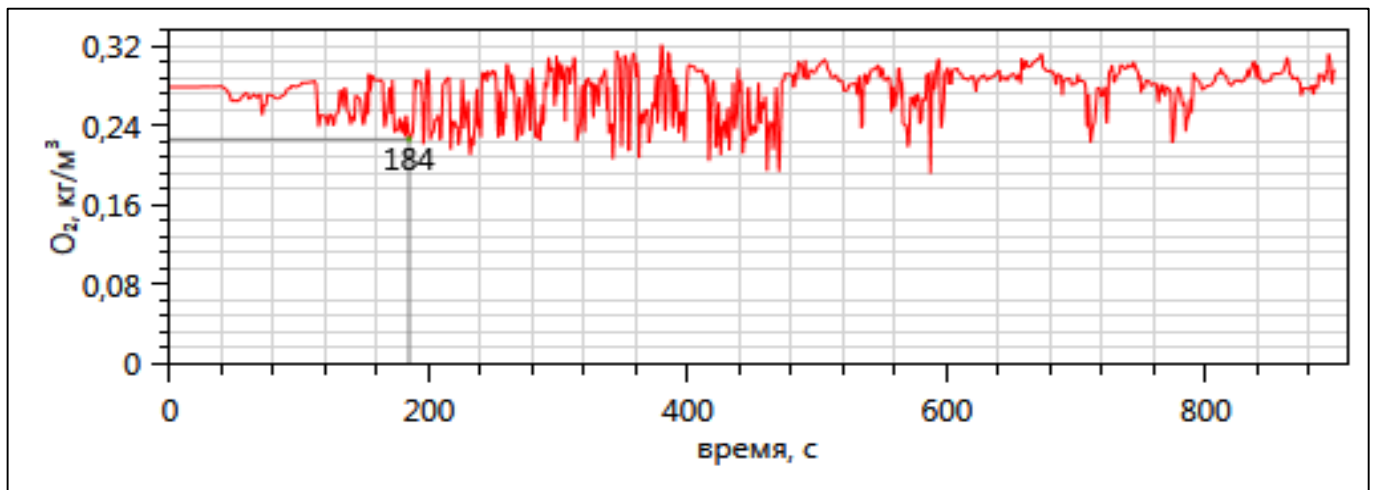


Рисунок 4.10 – Изменение концентрации кислорода в воздухе машинного зала АЭС

4. Критические значения концентрации монооксида углерода (СО) в помещении машинного зала наступит через 7,5 мин. с момента возникновения пожара (рисунок 4.11). Для защиты органов дыхания и зрения от воздействия вредных и токсичных веществ необходимо использование дыхательного аппарата со сжатым воздухом.

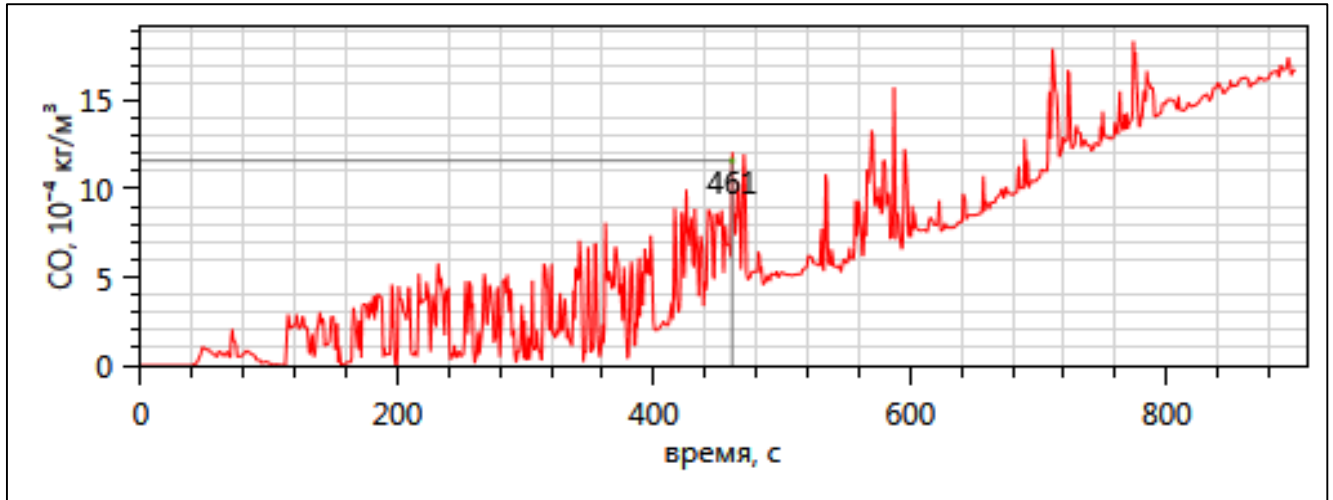


Рисунок 4.11 – График роста концентрации монооксида углерода в воздухе машинного зала АЭС

5. Стремительный рост ОФП в помещении машинного зала указывает на невозможность тушения пожара оперативным персоналом АЭС, однако в этот короткий период (до наступления критических значений ОФП) необходимо провести неотложные работы по эвакуации персонала, проведению экстренных технологических переключений оборудования и сбору информации о происшествии для передачи данных пребывающим подразделениям пожарной охраны. Все вышеперечисленные мероприятия необходимо проводить с использованием необходимых технических средств и средств защиты человека от воздействия ОФП с обязательным соблюдением требований техники безопасности. Одновременно с этим необходимо организовать встречу пожарных подразделений, подготовить допуск к тушению пожара, что, в свою очередь, позволит сократить время свободного развития пожара и минимизировать ущерб.

Как и любой пожар, пожар на объекте энергетики, как правило, начинается с небольшого очага. По мере развития пожара от него во времени и пространстве распространяются ОФП. Практика и приведенные выше расчеты показывают, что внутри помещений быстрее всего распространяется дым. Он снижает видимость, делает среду

токсичной и снижает в ней содержание кислорода. Вслед за дымом распространение получают тепловые процессы (излучение и теплоперенос) и непосредственно пламя.

Расчетно-аналитические исследования динамики пожаров для типичных помещений, зданий и технологических установок АЭС показали критические времена по достижению ОФП, величины их критических значений для людей на уровне рабочей зоны и время блокирования эвакуационных выходов в помещениях станций. Основным фактором пожара, при котором персонал не сможет продолжить работу в помещениях и зданиях АЭС, является потеря видимости. Так, на резервном пункте управления (далее – РПУ) критический временной показатель составит ~ 41 с, в помещении блочного пункта управления (БПУ) ~ 59 с, в реакторном здании ~ 76 с. Из представленных данных можно сделать вывод о необходимости срочной эвакуации персонала, не имеющего средств защиты от ОФП.

Следующий блок ОФП объединяет следующие показатели:

- по пониженному содержанию кислорода ( $O_2$ ) критический временной показатель на РПУ составит ~ 116 с, БПУ ~ 169 с, в реакторном здании ~ 290 с;
- по повышенному содержанию СО критический временной показатель на РПУ составит ~ 144 с, БПУ ~ 215 с, в реакторном здании ~ 262 с;
- по повышенному содержанию  $HC1$  критический временной показатель на РПУ составит ~ 67 с, БПУ ~ 97 с, в реакторном здании ~ 124 с.

Персонал станции, обеспеченный фильтрующими средствами защиты органов дыхания, также не сможет работать в условиях воздействия данных ОФП и должен покинуть помещения (здания) АЭС. В данных условиях осуществлять работу сможет персонал, обеспеченный изолирующими СИЗОД.

По повышенной температуре критический временной показатель на РПУ составит ~ 101 с, БПУ ~ 144 с, в реакторном здании ~ 157 с. В условиях воздействия данного ОФП персонал АЭС может осуществлять работу только в специальных средствах защиты тела человека.

Расчеты динамики возможных пожаров и анализ вариантов их развития в помещениях и зданиях АЭС показали, что основными ОФП, влияющими на безопасность

человека, являются снижение видимости в дыму и пониженная концентрация кислорода. Поэтому персонал АЭС обеспечивается индивидуальными самоспасателями, с помощью которых проводится эвакуация людей из помещений станции в безопасную зону. Проведенные расчеты показывают необходимость эвакуации персонала из помещений АЭС уже через 30 с от начала пожара.

Круглосуточный, сменный режим работы ОП АЭС в составе оперативных бригад обеспечивает контроль и управление реакторной установкой во всех режимах ее функционирования, даже в условиях загазованной и (или) непригодной для дыхания среды. В этой связи должностные лица из числа оперативного персонала должны обеспечиваться необходимым перечнем средств защиты от воздействия ОФП.

По представленным АЭС данным [220–222], в зависимости от типа реактора, время вывода реакторной установки в подкритическое состояние и ее безопасный останов может достигать нескольких часов. В течение этого времени ОФП будут неуклонно расти (повышение температуры, понижение концентрации кислорода, выделение большого количества СО). При отсутствии возможности покинуть помещения ЩУ, БПУ, РПУ и др. оперативный персонал должен иметь комплексную защиту при выполнении работ в условиях воздействия ОФП.

На рисунке 4.12 представлены основные задачи, выполняемые оперативным персоналом АЭС при пожаре (аварии).

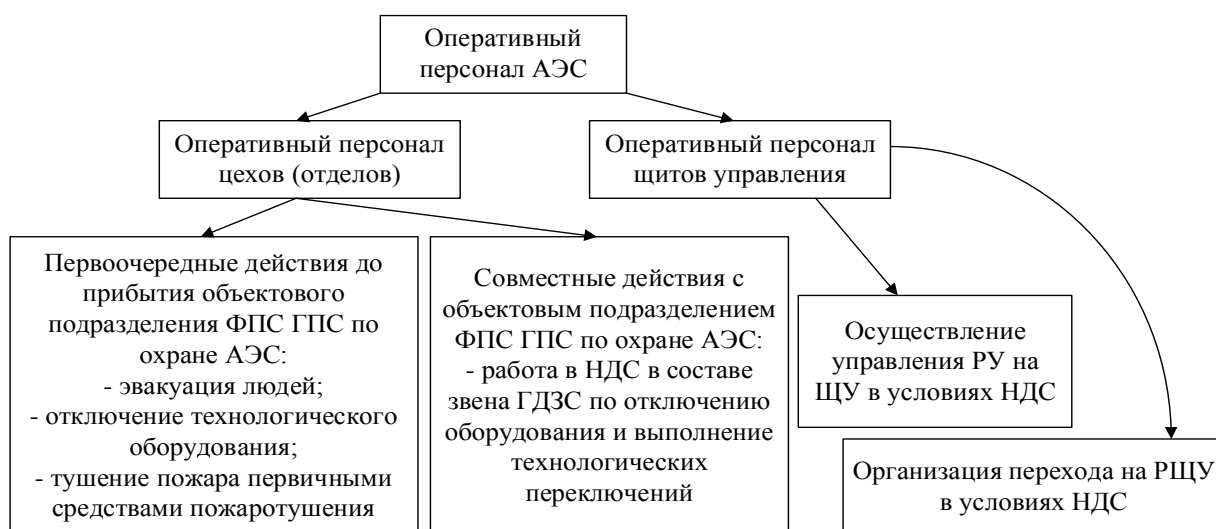


Рисунок 4.12 – Защита оперативного персонала для обеспечения перевода АЭС в подкритическое состояние

Были проведены исследования на пяти АЭС в европейской части России по соответствию степени защиты оперативного персонала характеру распространения ОФП, по результатам которых разработан комплект защиты оперативного персонала и проведена его апробация. Разработана соответствующая расчетная модель, позволяющая определить возможность и надежность выполнения оперативным персоналом АЭС первичных действий в начальной стадии пожара в условиях воздействия ОФП.

На основе исследования динамики развития ОФП в типовых помещениях АЭС с реактором типа РБМК разработаны модели действий оперативного персонала. Так, для оперативного персонала блочного щита управления временные показатели действий можно представить в следующем виде:

$$T_{\text{доП}} = T_{\text{обн}} + T_{\text{надСЗ}} + T_{\text{разв}} + T_{\text{туш}} + T_{\text{выхНДС}} + T_{\text{инф}}, \quad (4.1)$$

где  $T_{\text{доП}}$  – время действий оперативного персонала, мин.;

$T_{\text{обн}}$  – время обнаружения пожара, мин.;

$T_{\text{надСЗ}}$  – время надевания средств защиты, мин.;

$T_{\text{разв}}$  – время разведки очага пожара, мин.;

$T_{\text{туш}}$  – время тушения очага пожара, мин.;

$T_{\text{выхНДС}}$  – время выхода из непригодной для дыхания среды, мин.;

$T_{\text{инф}}$  – время передачи информации о пожаре подразделениям пожарной охраны, мин.

Временные показатели действий оперативного персонала в помещениях машинного зала АЭС, можно представить в следующем виде:

$$T_{\text{доП}} = T_{\text{обн}} + T_{\text{сообщОП}} + T_{\text{сбор}} + T_{\text{дв}} + T_{\text{надСЗ}} + T_{\text{разв}} + T_{\text{туш}} + T_{\text{выхНДС}} + T_{\text{инф}}$$

где  $T_{\text{сообщОП}}$  – время сообщения о возникновении пожара оперативному персоналу, мин.;

$T_{\text{сбор}}$  – время сбора оперативного персонала для выдвижения к месту возникновения пожара, мин.;

$T_{\text{дв}}$  – время движения оперативного персонала к месту пожара, мин.



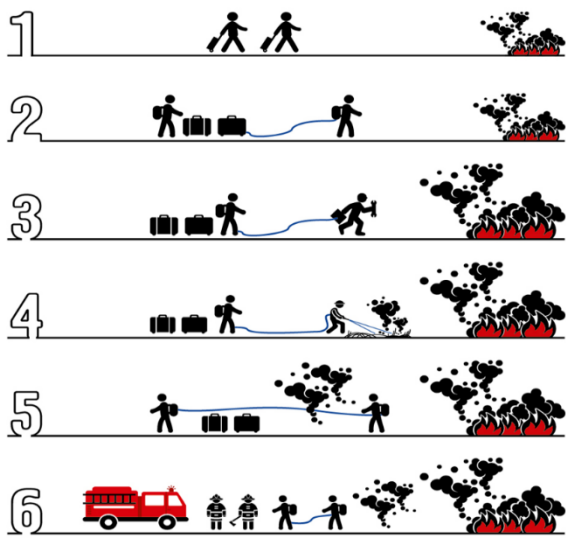


Рисунок 4.13 – Модель действий оперативного персонала щитов управления АЭС

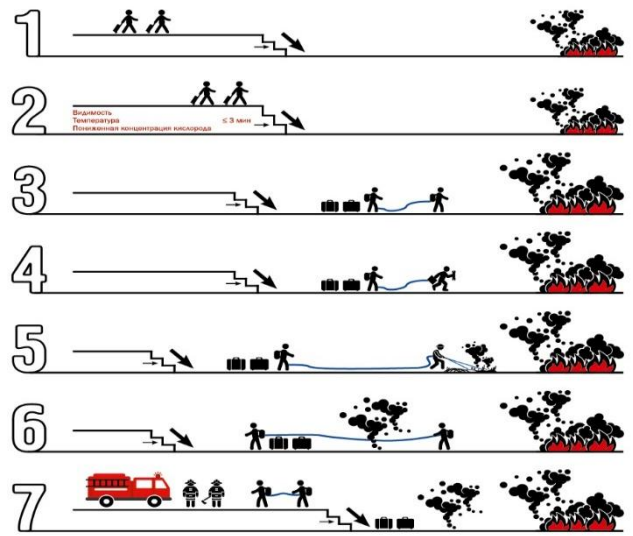


Рисунок 4.14 – Модель действий оперативного персонала машинного зала АЭС

Изучение процесса действий оперативного персонала показало, что временные характеристики этих действий являются, как правило, вероятностными, нечеткими или интервальными. Моделирование таких процессов предусматривает совершение алгебраических действий с недетерминированными величинами – сложение, вычитание, умножение, деление, взятие функций.

Применительно к вопросам обеспечения пожарной безопасности АЭС рассмотрены вопросы действий оперативного персонала с интервальными величинами, при этом использовались следующие положения [133]–[136]:

а) интервальное число  $[x] = [x_m, x_6]$  равномерно распределено на отрезке с левой границей  $x_m$  и правой границей  $x_6$ .

б) в результате действий с двумя интервальными числами  $[x_1]$  и  $[x_2]$  также получается интервальное число  $[y] = [y_m, y_6]$ , границы которого определяются по выражению:

$$\begin{bmatrix} y_m \\ y_6 \end{bmatrix} = \alpha_1 \mp \sqrt{3(\alpha_2 - \alpha_1^2)}, \quad (4.2)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – параметры (начальные моменты), которые для некоторых алгебраических действий приведены в таблице 4.1.



Таблица 4.1 – Начальные моменты для определения границ результирующего интервального числа при арифметических действиях

Действие	$[y]=f([x_1],[x_2])$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Сложение, вычитание	$[y]=[x_1]\pm[x_2]$	$\frac{x_{1м} + x_{1б} \pm x_{2м} \pm x_{2б}}{2}$	$\pm \frac{(x_{1м} + x_{1б})(x_{2м} + x_{2б})}{2} + \frac{x_{1м}^2 + x_{1м}x_{1б} + x_{1б}^2 + x_{2м}^2 + x_{2м}x_{2б} + x_{2б}^2}{3}$
Умножение	$[y]=[x_1][x_2]$	$\frac{(x_{1м} + x_{1б})(x_{2м} + x_{2б})}{4}$	$\frac{(x_{1м}^2 + x_{1м}x_{1б} + x_{1б}^2)(x_{2м}^2 + x_{2м}x_{2б} + x_{2б}^2)}{9}$
Деление	$[y] = \frac{[x_1]}{[x_2]}$	$\frac{x_{1м} + x_{1б}}{2(x_{2б} - x_{2м})} \ln \frac{x_{2б}}{x_{1м}}$	$\frac{x_{1м}^2 + x_{1м}x_{1б} + x_{1б}^2}{3x_{2м}x_{2б}}$
Обратная величина	$[y] = \frac{1}{[x_1]}$	$\frac{1}{x_{1б} - x_{1м}} \ln \frac{x_{1б}}{x_{1м}}$	$\frac{1}{x_{1м}x_{1б}}$

При алгебраических действиях над  $n$  интервальными числами  $[x_1], [x_2], \dots, [x_n]$  сохраняются правила аддитивности и коммутативности. Например, при сложении трех ( $n = 3$ ) интервальных чисел:

$$[y] = [x_1] + [x_2] + [x_3] = [x_1] + [x_4] = [x_3] + [x_5], \quad (4.3)$$

где  $[x_4] = [x_2] + [x_3]$ ;  $[x_5] = [x_1] + [x_2]$ .

При сложении/умножении:

$$[y] = [x_1]([x_2] + [x_3]) = [x_1][x_2] + [x_1][x_3] = [x_3][x_1] + [x_1][x_2]. \quad (4.4)$$

В частном случае, когда имеет место «цепочка» сложений, можно использовать следующее правило: математическое ожидание  $y_{ср}$  результирующей интервальной величины  $[y]$  равно сумме математических ожиданий суммируемых чисел, а дисперсия  $D_y$  – сумме дисперсии:

$$\begin{bmatrix} y_m \\ y_b \end{bmatrix} = 0,5 \left[ \sum_{i=1}^n (x_{iм} + x_{iб}) \mp \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{iб} - x_{iм})^2} \right]. \quad (4.5)$$

Так, при оценке суммарного времени действий оперативного персонала при пожаре на щите управления АЭС исходим из следующих условий, что эти действия состоят из шести этапов ( $n = 6$ ), а продолжительность каждого этапа – интервальная величина  $[t_{iм}, t_{iб}]$ , значения которой приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Временные характеристики этапов действий оперативного персонала при пожаре на щите управления

Этап	Получение сигнала о пожаре (1)	Надевание СЗ, включение в ДАСВ (2)	Сбор информации, проведение переключений (3)	Тушение пожара первичными средствами пожаротушения (4)	Выход из НДС, переход на запасный ЩУ (5)	Передача информации прибывающим пожарным (6)
$t_{им}$ , МИН	0,5	4	2	3	2	1
$t_{iб}$ , МИН	1,5	5	3	5	4	3

По результатам расчетов получена интервальная оценка общего времени действий персонала при пожаре на щите управления АЭС:  $[y] = [13,1; 20,9]$  мин.

При оценке суммарного времени действий оперативного персонала при пожаре в машинном зале АЭС исходим из следующих условий, что эти действия состоят из восьми этапов ( $n = 8$ ), а продолжительность каждого этапа – также интервальная величина  $[t_{им}, t_{iб}]$ , приведенная в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Временные характеристики этапов действий оперативного персонала при пожаре в машинном зале атомной электростанции

Этап	Обнаружение пожара (1)	Сообщение НСС, ПСЧ по охране АЭС (2)	Время сбора средств защиты (3)	Движение к месту пожара (4)	Надевание СЗ, включение в ДАСВ (5)	Сбор информации, переключения, тушение (6)	Выход из зоны НДС (7)	Передача информации прибывающим пожарным (8)
$t_{им}$ , МИН.	0,5	1	1	5	4	2	2	1
$t_{iб}$ , МИН.	1,5	3	3	6	5	3	4	3

В результате расчетов получена интервальная оценка общего времени действий оперативного персонала при пожаре в машинном зале атомной электростанции:  $[y]=[18,0; 27,0]$  мин.

В результате проведенного расчета энергозатрат человека по доставке оборудования к месту пожара можно сделать вывод о том, что при переносе оборудования массой  $\sim 40$  кг энергозатраты составят  $\sim 416$  Вт, что в соответствии с ГОСТ

12.1.005-88. «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» приравнивается к тяжелой физической работе [223].

В природе многие процессы могут складываться из нескольких операций, обладающих временными характеристиками. Эти характеристики являются, как правило, недетерминированными – вероятностными [103], нечеткими [224] или интервальными [102]. Далее в работе будут рассмотрены примеры использования данного подхода к оценке временных характеристик действий оперативного персонала АЭС до прибытия подразделений пожарной охраны.

Требуется дать оценку суммарного времени действий оперативного персонала при пожаре на БЩУ АЭС. Известно, что эти действия состоят из шести этапов ( $n=6$ ) [225], а продолжительность каждого этапа – интервальная величина  $[t_{iм}, t_{iб}]$ , приведенная в таблице 4.2.

В итоге, используя (4.5), получаем:

$$\begin{bmatrix} y_m \\ y_б \end{bmatrix} = 17,0 \pm 3,9$$

Таким образом получена интервальная оценка общего времени действий оперативного персонала при пожаре на щите управления атомной электростанции:  $[y] = [13,1; 20,9]$  мин.

Аналогично оценивается суммарное время действий оперативного персонала при пожаре в помещении машинного зала АЭС. Известно, что эти действия состоят из восьми этапов ( $n = 8$ ) [225], а продолжительность каждого этапа – также интервальная величина  $[t_{iм}, t_{iб}]$ , приведенная в таблице 4.3.

В итоге из выражения (4.5) получаем:

$$\begin{bmatrix} y_m \\ y_б \end{bmatrix} = 22,5 \pm 4,5 .$$

Нами получена интервальная оценка общего времени действий оперативного персонала при пожаре в машинном зале атомной электростанции:  $[y]=[18,0; 27,0]$  мин.

С использованием интервального анализа становится возможным с большей объективностью оценивать временные характеристики действий оперативного

персонала при пожарах на атомных электростанциях. Это, в свою очередь, позволит пожарно-спасательным подразделениям по охране АЭС объективно планировать действия по тушению пожаров, а учебно-тренировочным центрам АЭС – эффективно готовить должностных лиц станции к действиям при возникновении пожаров в помещениях АЭС в начальной стадии их развития [226].

Таким образом, при расчете временного показателя действий оперативного персонала применены максимальные показатели, однако силы человека не безграничны, тем более что в состав оперативного персонала могут входить люди старше 65 лет. В случаях возникновения пожаров (загораний) действия ОП будут затруднены с учетом роста воздействия ОФП. Одновременно с этим прямо пропорционально увеличится временной показатель действий персонала по прибытию, сбору информации и тушению пожара.

Анализ распространения ОФП и готовности оперативного персонала по действиям в начальной стадии пожара позволил сформировать концепцию, сочетающую возможности оперативного персонала при сохранении приемлемого уровня его безопасности. С одной стороны, оперативный персонал защищен от некоторых ОФП, по сравнению с человеком без средств защиты, а с другой – степень его защиты, уровень подготовки и здоровья меньше, чем у пожарных. Концепция заключается в ограничении действий персонала в зависимости от уровня воздействия ОФП.

#### **4.2 Прогнозирование временных показателей действий подразделений пожарной охраны при возникновении пожара на объекте энергетики**

Проведенный в данной работе анализ следования объектовых подразделений ФПС по охране АЭС к месту вызова (пожара) на территорию АЭС показал, что позднее обнаружение пожара, не своевременный вызов пожарных подразделений, задержка срабатывания автоматических средств пропуска на территорию АЭС увеличивает время их прибытия от 2 до 35 мин. (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Реагирование подразделений ФПС по охране АЭС

Атомная станция	Объектовое подразделение ФПС ГПС	Объект защиты АЭС	Дата	Расстояние от ПЧ до КПП, км	Время следования, мин.	Примечание
САЭС	ПСЧ-1	Склад дизельного топлива	31.10.2012	0,15	2	–
САЭС	ПСЧ-1	Помещение 220/11	22.04.2013	0,15	2	–
САЭС	ПСЧ-1	Помещение 301/1	05.03.2014	0,15	2	–
КуАЭС	ПСЧ-8	Цех ТАИ, пом. 353	22.01.2013	0,1	5	–
КуАЭС	ПСЧ-8	Пом. 136/1 реакторного цеха	04.04.2014	0,1	5	–
КуАЭС	ПСЧ-8	Пом. 114/1 реакторного цеха	07.04.2014	0,1	5	–
БелАЭС	ПСЧ-35	Крыша дизельной этажерки реактора БН-600	27.06.2013	1	35	Сообщение о пожаре поступило через 25 мин после обнаружения
КуАЭС	ПСЧ-8	Силовая сборка 17001н кру 0.4 кВ пом. № 103/1 блока всро	20.03.2014	0,8	20	Сообщение о пожаре поступило через 6 мин после обнаружения
РСТАЭС	ПСЧ-37	Открытая площадка ресиверов водорода, азота	09.02.2015	0,2	16	Сообщение о пожаре поступило через 7 мин после обнаружения
КЛНАЭС	ПСЧ-8	Фаза «в» шунтирующего реактора р-1-750	23.07.2010	0,5	4	–

Важно отметить, что до прибытия пожарных подразделений оперативный персонал действует согласно утвержденной на АЭС инструкции, при этом существует необходимость сбора информации о возникшем пожаре (загорании), эвакуации персонала, а также проведении технологических переключений (отключений) оборудования. Вместе с этим при неразвившемся пожаре оперативный персонал принимает посильные меры по его тушению первичными средствами пожаротушения [214].

Проведенные исследования динамики развития пожара на БЦУ 3-го энергоблока Кольской АЭС в рамках работ по повышению пожарной безопасности

станции показали, что наиболее вероятная ситуация развития аварии при возникновении пожара – это тушение персоналом пожара на начальной стадии. При этом, если меры по тушению не привели к успеху (большая начальная мощность источника зажигания, развитие пожара в подпольном пространстве, другом труднодоступном месте и т.п.), длительное горение даже одного шкафа электротехнических устройств приводит к потере БЦУ. Это происходит, в первую очередь, по причине потери видимости при пожаре в защитовом пространстве. Время потери видимости для зального помещения не превышает 10 мин. Своевременное прибытие и начало успешных действий пожарных подразделений при данных сценариях развития пожара маловероятно [226].

При расчете временных промежутков следования до места пожара на критически важных объектах не учитывается время преодоления контрольно-пропускного пункта (далее – КПП), имеющего барьерное ограждение и предполагающего скорость движения пожарных автомобилей не более 5 км/ч с вынужденной остановкой. Помимо этого при проведении расчета времени подачи первого ствола не учитывается время, которое необходимо часовому Федеральной службы войск национальной гвардии Российской Федерации для открытия режимных помещений, находящихся под охраной.

Для того, чтобы определить фактические временные промежутки, из которых складывается время свободного развития пожара, на критически важном для национальной безопасности Российской Федерации объекте, находящемся под охраной Федеральной службы войск национальной гвардии Российской Федерации, филиале АО «Концерн Росэнергоатом “Смоленская атомная станция” были проведены экспериментальные пожарно-тактические учения. Целью учений была оценка времени прибытия и влияния задержки времени прибытия на рост площади предполагаемого пожара согласно вариантам, рассмотренным в плане тушения пожара.

Расчеты проведены по четырем наиболее вероятным сценариям возникновения пожара: кровля машинного зала; помещение №404 здания хранилища отработанного ядерного топлива; кабельный полуэтаж блочного щита управления; главный маслоблок.

При проведении измерений было учтено, что для въезда на территорию охраняемого объекта имеется два автомобильных КПП. Первый КПП (центральный) расположен в непосредственной близости от здания пожарного депо (на расстоянии 200 м). Второй КПП расположен на противоположной стороне периметра территории на расстоянии 2,7 км от пожарного депо. Для непрерывного потока транспортных средств (въезжающих на территорию объекта и выезжающих с него), на этих КПП имеются по двое ворот (одни на въезд, вторые на выезд). Каждый КПП оборудован физическими барьерами защиты, представляющими собой тяжелые железные заграждения, установленные в шахматном порядке. Перед воротами контрольно-пропускного пункта по всей их длине имеется механический наземный подъемный барьер.

В целях антитеррористической защиты порядок допуска военнослужащими Федеральной службы войск национальной гвардии Российской Федерации на территорию охраняемого объекта предусматривает досмотр транспортных средств на смотровой площадке, которая расположена между внешними и внутренними воротами КПП.

При чрезвычайных происшествиях (пожар, взрыв, авария), а также при проведении пожарно-тактических занятий предусмотрено, что пожарные автомобили с личным составом пожарно-спасательной части охраняющей АЭС допускаются на территорию по специальным пропускам беспрепятственно. Часовой КПП, получив сообщение о пожаре и других чрезвычайных происшествиях от начальника караула или подаче сигнала «Сирена» (включенные проблесковые маяки и звуковой сигнал на пожарном автомобиле), обязан принять меры к освобождению двух проездов через КПП от транспорта и при наличии на ветровом стекле пожарного автомобиля специального пропуска беспрепятственно пропустить машины с боевым расчетом на территорию объекта через КПП по двум проездам. Пожарные машины проезжают КПП со скоростью не более 5 км/час. Однако на практике в рабочее время на КПП всегда находятся автомобили. Часто один автомобиль находится на смотровой площадке на выезд, а на въезде досмотровая площадка свободна, или наоборот. Нельзя исключать возникновение нештатной ситуации, при которой проезд через

первый КПП не представляется возможным. Поэтому необходимо рассмотреть возможные варианты событий и экспериментально исследовать временные промежутки от получения сигнала «Тревога» до момента прибытия первого пожарного подразделения к месту условного пожара с учетом взаимодействия с Федеральной службой войск национальной гвардии Российской Федерации.

В ходе проведения пожарно-тактических учений произведены замеры временных показателей для трех вариантов проезда на территорию Смоленской АЭС.

Вариант 1. Следование к месту условного пожара через первый КПП. При преодолении территории КПП учитываются условия наличия дополнительных помех в виде автомобилей, проезжающих КПП или заграждающих въезд, либо въезд и выезд. Таким образом, создается необходимость принудительного освобождения проездов, что занимает дополнительное время.

Вариант 2. Следование к месту условного пожара через первый КПП. При преодолении территории КПП учитываются условия беспрепятственного проезда.

Вариант 3. Следование к месту условного пожара через второй КПП. При преодолении территории КПП учитываются условия невозможности проезда через первый КПП по причине его блокирования.

Результаты оценки временных показателей прибытия в ходе экспериментальных пожарно-тактических учений представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Временные показатели прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова и возврата в подразделение при проведении экспериментальных пожарно-тактических учений на Смоленской АЭС

Время прибытия первого автомобиля к КПП	Время проезда КПП	Время прибытия к месту пожара	Время проезда КПП первого автомобиля по пути в подразделение	Общее время проезда КПП по пути в подразделение
<b>Вариант 1</b>				
53 с	59 с	104 с	220 с	645 с
<b>Вариант 2</b>				
45 с	44 с	73 с	136 с	504 с
<b>Вариант 3</b>				
238 с	57 с	453 с	–	–

Полученные результаты использованы для проведения дальнейших расчетов, согласно исходным вариантам возникновения пожара на Смоленской АЭС. Для



проведения расчетов используются значения минимального (вариант 2) и максимального (вариант 3) показателей с округлением до целого.

Вариант 1. Пожар возник на кровле машинного зала Смоленской АЭС. По наилучшему варианту площадь пожара на момент прибытия первого подразделения составила более 5 тыс. м<sup>2</sup>, а по наихудшему – более 9 тыс. м<sup>2</sup>.

Вариант 2. Пожар возник в помещении № 404 здания хранилища отработанного ядерного топлива. По наилучшему варианту площадь пожара на момент прибытия первого подразделения составила более 130 м<sup>2</sup>, по наихудшему – более 280 м<sup>2</sup>.

Вариант 3. Тушение пожара в кабельном полуэтаже блочного щита управления (средняя секция). По наилучшему варианту площадь пожара на момент прибытия первого подразделения составила 33 м<sup>2</sup>, по наихудшему – 73 м<sup>2</sup>.

Таким образом, исходя из проведенных расчетов, получаем прямую зависимость роста площади пожара за счет увеличения времени свободного развития пожара. Масштабы пожара с учетом взаимодействия с Федеральной службой войск национальной гвардии Российской Федерации и без нее отличаются практически в 2 раза. Расчет прироста площади пожара за время прибытия для разных вариантов задержек приведен на рисунке 4.15.

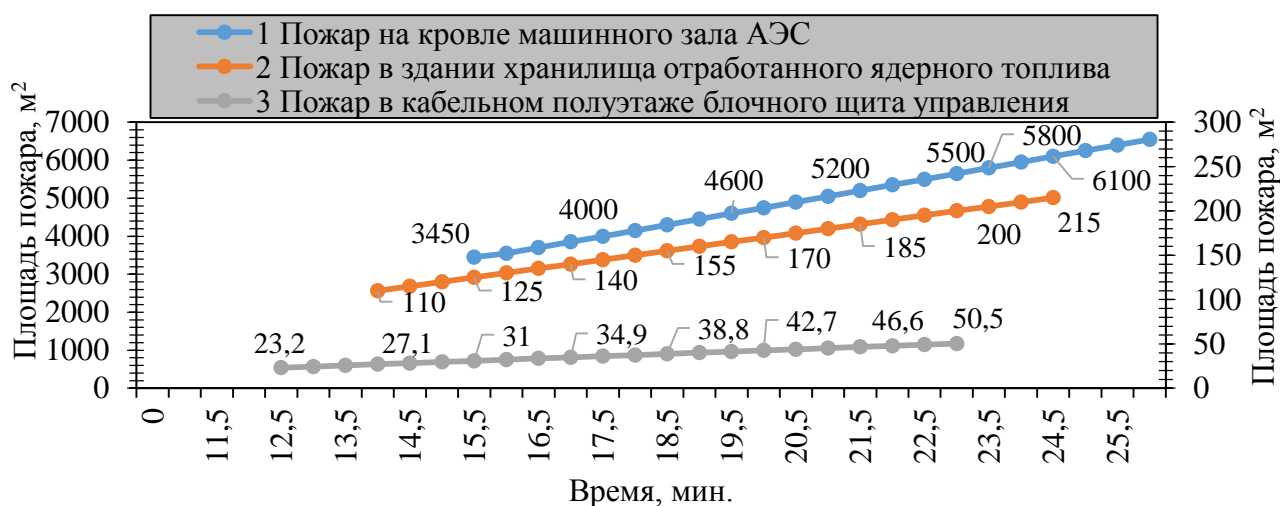


Рисунок 4.15 – Графики зависимости площади различных сценариев пожара на АЭС от времени свободного развития пожара

На графиках приведена зависимость площади пожара от времени его свободного развития, где время разворачивания сил и средств и время до сообщения – константы, а время следования увеличено от расчетного с интервалом 30 с. Из проведенных расчетов очевидно, что чем меньше время свободного развития пожара, тем меньше его площадь. Если рассматривать действия пожарной охраны на этой стадии, то временные промежутки можно сократить за счет оперативного прибытия к месту вызова и быстрого разворачивания сил и средств. Если скорость разворачивания сил зависит от условий обстановки на пожаре, физической натренированности, тактической и психологической подготовки личного состава подразделений, типов и видов вводимых стволов, мест их введения, способов и приемов разворачивания сил и средств, то оперативность прибытия к месту вызова напрямую зависит от скорости пожарного автомобиля на всем маршруте следования. Для достижения максимально оперативного прибытия к месту вызова необходимо четкое и отлаженное взаимодействие с Федеральной службой войск национальной гвардии Российской Федерации по оптимизации и сокращению времени, необходимого для получения допуска на территорию режимного объекта. Именно этот фактор напрямую повысит эффективность тушения возможных пожаров на Смоленской АЭС и других критически важных для национальной безопасности страны объектах.

Механизм работы пожарных в условиях задымления предполагает последовательное преодоление зон пожара, конечной целью которого является достижение зоны горения и его ликвидация. Выделяют следующие зоны пожара:

горение – часть пространства, в котором происходит подготовка горючих веществ к горению и их горение;

тепловое воздействие – часть пространства на пожаре, в котором происходит заметное изменение материалов, конструкций от воздействия тепла и делает невозможным пребывание в нем людей без средств защиты. Условие безопасности – температура не более 60–70 °С или лучистый поток не более 3500 Вт/м<sup>2</sup>;

задымление – часть пространства на пожаре, заполненного дымовыми газами (продуктами разложения) в конструкциях, создающими угрозу жизни и здоровью людей и животных, затрудняющими действия участников тушения пожара.

Определению критической задымленности (критической видимости при задымлении) посвящен целый ряд исследований [41], [183], [227–238]. Авторы этих исследований в качестве параметра, характеризующего предельную видимость, принимали такие различные физические величины, как освещенность на путях эвакуации [41], [227], яркость и контрастность наблюдаемых объектов [228], дальность видимости [183], [234], [229–233], оптическую плотность и показатель ослабления задымленной среды [234]. Такие различные взгляды говорят об отсутствии единого подхода по определению критической видимости в дыму, хотя в контексте рассматриваемых вопросов предложенные критерии каким-либо образом связаны между собой. В зависимости от параметров помещения, геометрии эвакуационных путей и выходов возможно обсуждать некоторую допустимую дальность видимости – как минимальное расстояние, при котором видимость позволяет обеспечивать уверенное движение эвакуирующихся людей на протяжении всего отрезка эвакуационного пути. Эта величина определяется как расстояние между двумя наиболее удаленными друг от друга соседними ориентирами, задающими прямолинейный отрезок пути на одном из маршрутов. Наибольшее число выполненных работ показывает, что именно снижение дальности видимости до минимально допустимой рассматривается как критерий наступления опасности. Также отмечено, что существует абсолютный минимум дальности видимости, ниже которого возможны проявления эмоциональной неустойчивости у людей и возникновение паники. Экспериментальные данные [235] показали, что только 30 % людей преодолевали задымленный участок длиной более 9 м, а при знакомом пути эвакуации – 15 м.

В работах [234], [236] рекомендуется принимать критические значения показателя ослабления среды в 15 м – для людей, не знакомых с путями эвакуации, 4,6 м – для людей, знакомых с путями эвакуации. Согласно [230], [231] требуемая для безопасной эвакуации минимальная дальность видимости составляет приблизительно 10 м; согласно исследованиям [232] – от 15 до 20 м, согласно [183] – 20 м.

Противоречивость данных затрудняет проведение анализа, однако можно сделать вывод, что при дальности видимости более 20 м психологической неустойчивости у людей не возникает. Подведя итог определения критической видимости

в дыму, можно сделать вывод, что обеспечение минимально допустимой дальности видимости является необходимым условием безопасной эвакуации персонала объектов при пожаре [237], [238]. Ухудшение видимости при задымлении определяется плотностью, которая оценивается по толщине слоя дыма, через который не виден свет эталонной лампы, или количество твердых частиц, содержащихся в единице объема, и измеряется в  $\text{г/м}^3$  (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Характеристика дыма в зависимости от его плотности

Наименование дыма	Плотность дыма, $\text{г/м}^3$	Видимость предметов, освещенных лампой в 21 свечу, м
Плотный	Более 1,5	До 3
Средней плотности	От 0,6 до 1,5	От 3 до 6
Слабой плотности	От 0,1 до 0,6	От 6 до 12

При внутренних пожарах наибольшую протяженность, как правило, имеет зона задымления, причем она различается по плотности дыма и накладывается на зону теплового воздействия, вплотную подходя к зоне горения. Расположение указанных зон на пожаре может быть различным, но наиболее часто встречающееся приведено на рисунке 4.16.

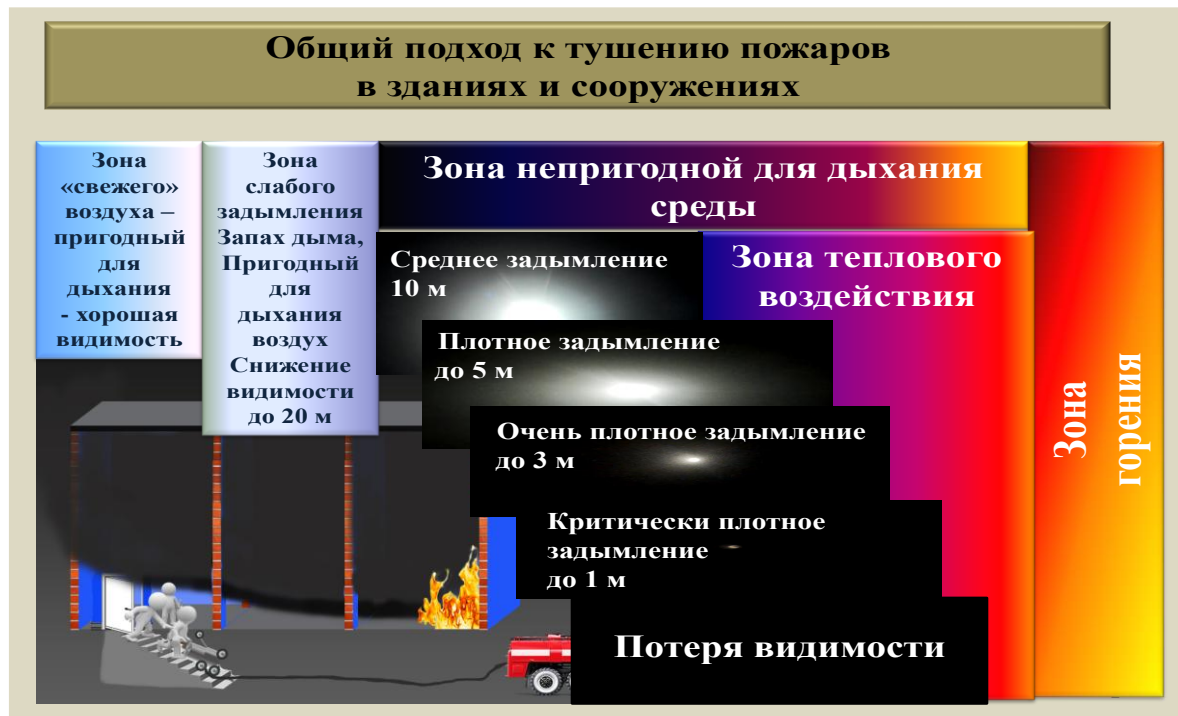


Рисунок 4.16 – Расположение зон воздействия ОФП при пожарах в помещениях объектов энергетики

В работах [239], [240] изложены результаты исследования по изменению скорости передвижения звеньев ГДЗС в зависимости от дальности видимости (рисунок 4.17).

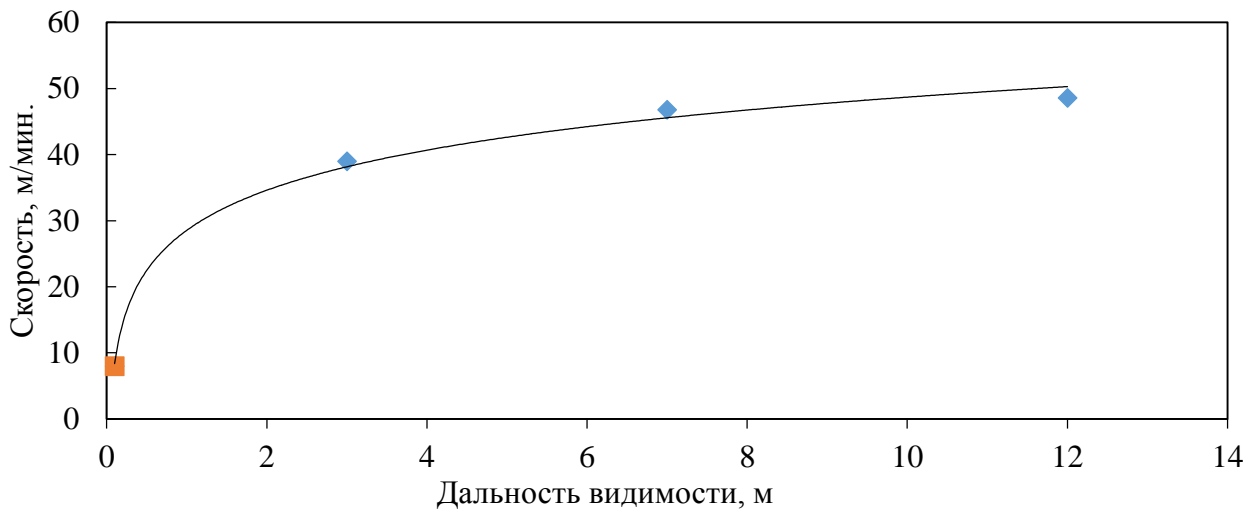


Рисунок 4.17 – График изменения средней скорости движения звена ГДЗС от снижения видимости:

- – результаты исследования И. В. Коршунова и др. [240];
- ◆ – результаты исследования И. М. Чистякова и др. [239]

Условия проведения эксперимента состояли в следующем. Звеньям ГДЗС ставилась задача преодолеть участок коридора протяженностью 35 м, при этом на панорамную маску для имитации снижения видимости в дыму были установлены тонирующие пленки разной светопропускной способности. Учет освещенности коридора и коэффициент Альбедо позволил авторам [239] определить дальность видимости в зависимости от тонирующей способности пленки.

В работе [240] условия проведения эксперимента были схожи. Перед звеном ГДЗС ставилась задача обнаружить пострадавших в помещении. Для начала поиска пострадавших звено ГДЗС проходило по коридору длиной 30 м. Панорамная маска затемнялась до обеспечения нулевой видимости. Изменение дальности видимости с 12 до 3 м привело к снижению скорости продвижения звена ГДЗС всего на 20 %. В случае падения видимости менее одного метра скорость движения звена ГДЗС снижается в четыре раза.

Следует отметить, что звенья ГДЗС, участвующие в ходе эксперимента,

знали о маршруте продвижения и отсутствии прямой угрозы для жизни и здоровья. Тем не менее, результаты исследований показали, что снижение видимости до одного метра приводит к значительному повышению времени для выполнения поставленной задачи.

Данный факт подчеркивает, что в зоне плотного задымления, соответствующего минимальной видимости, в разы увеличивается время выполнения задач звеньями ГДЗС. Особенно это актуально для объектов энергетики, так как сложная планировка помещений, наличие промышленного оборудования, высокое напряжение вносят дополнительные риски для звеньев ГДЗС. Поэтому снижение видимости на данных объектах может иметь решающее значение для выбора тактики тушения пожара, а также средств и методов тушения.

Применение водосодержащих ОТВ на объектах энергетики также предопределяет важность такого критерия, как дальность видимости в задымленном помещении, от которого зависит обеспечение безопасности звеньев ГДЗС, подающих ОТВ в зону горения с риском попадания струи на токоведущие части и оборудование под напряжением. Плотность задымления и дальность видимости зависят от вида горючей нагрузки, площади горения и интенсивности теплового потока [241].

Обеспечение приемлемой зоны видимости для работы звеньев ГДЗС в дыму является актуальной проблемой. Однако анализ отечественных и зарубежных работ [239, 240] показал, что до настоящего времени не сформулировано такое понятие, как условия видимости (достаточные, недостаточные) для пожарного в задымленной зоне.

Таким образом, предлагается под условием достаточной видимости для пожарного понимать расстояние видимости, превышающее дальность действия источника опасности в условиях пожара. В условиях задымления объекта энергетики данные условия будут изменяться в зависимости от условий работы и выполняемых задач, что схематично изображено на рисунке 4.18.

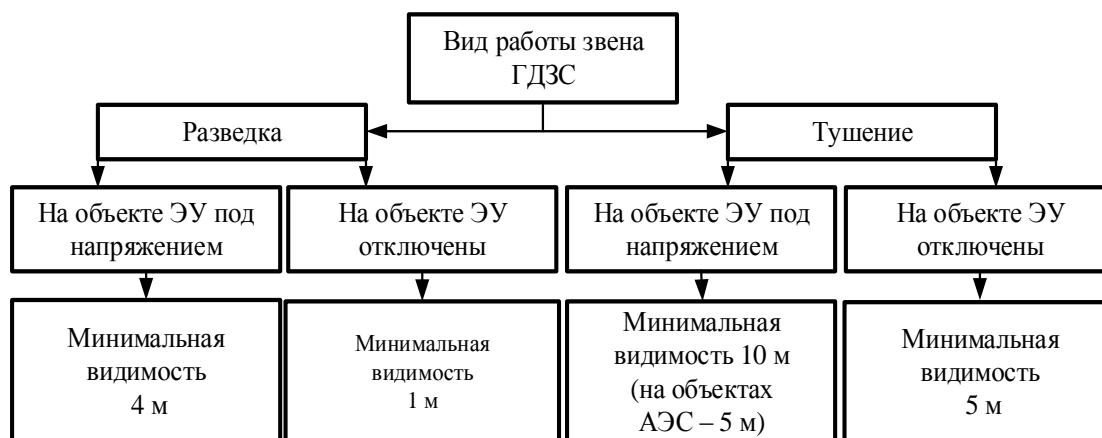


Рисунок 4.18 – Схема определения условий достаточной видимости для действий пожарных при тушении пожаров на объектах энергетики

С практической точки зрения критерий достаточной или недостаточной видимости может использоваться руководителем тушения пожара (РТП) в качестве основания для принятия мер по улучшению видимости. При поступлении информации с участков тушения пожаров о видимости в задымленном помещении и сопоставлении расстояния действия наиболее вероятного сопутствующего ОФП, РТП может принять решение о необходимости действий, направленных на увеличение дальности видимости [242]. При отсутствии технических возможностей улучшения видимости в задымленных зонах в процессе тушения пожара пожарные вынуждены работать в условиях недостаточной видимости, а иногда практически полного ее отсутствия. Такие условия могут снизить скорость продвижения к очагу в десять и более раз, а при сочетании плотного задымления с тепловым воздействием – полностью остановить продвижение пожарных.

#### **4.3 Методы обеспечения готовности персонала объектов энергетики и пожарных к действиям в условиях воздействия опасных факторов пожара**

С целью подготовки оперативного персонала к выполнению обязанностей, связанных с использованием дыхательных аппаратов, необходимо пройти соответ-

ствующее специальное обучение на право их использования. Кроме этого, для поддержания навыков работы на высоком уровне, а также выработки психологической устойчивости и физиологической готовности персонала объектов энергетики целесообразно проводить периодические практические занятия (тренировки) с использованием дыхательных аппаратов [243]. Тренировки необходимо поделить на направления, представленные на рисунке 4.19. Данное направление будет рассмотрено на примере готовности оперативного персонала и пожарных по охране АЭС.

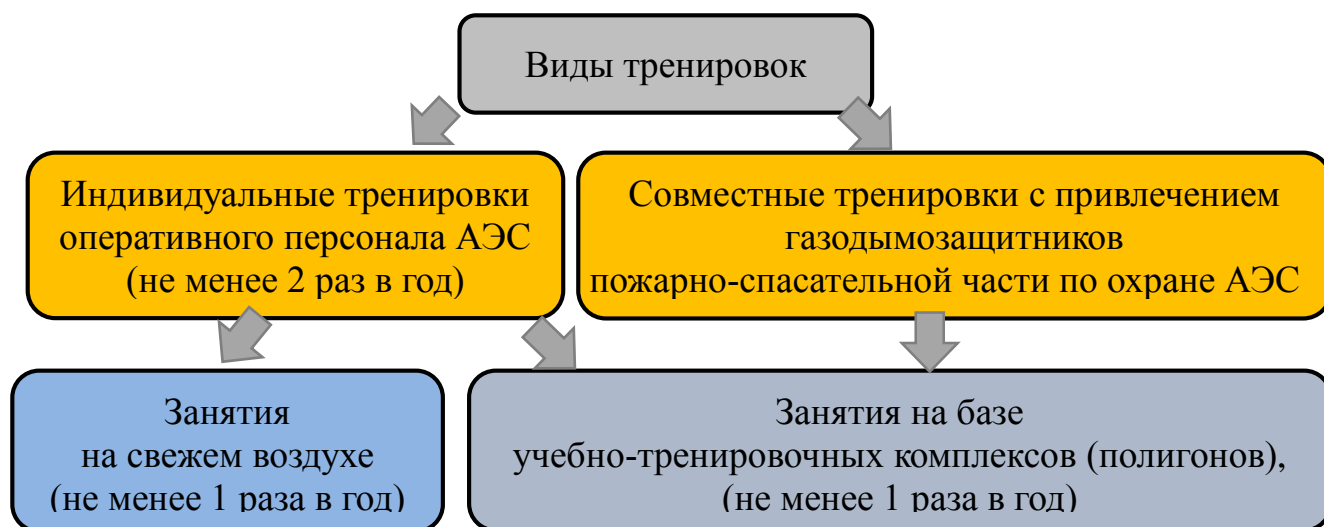


Рисунок 4.19 – Виды тренировок оперативного персонала АЭС

Для постоянной готовности персонала АЭС к выполнению обязанностей в непригодной для дыхания среде при пожарах, рекомендуется проводить практические занятия в рамках противопожарных тренировок и ежегодной программы поддержания квалификации не менее двух раз в год (одна тренировка на свежем воздухе и одна тренировка на базе учебно-тренировочного комплекса (полигона) (далее – УТК(П)). Как показывает прогноз возможной обстановки в результате пожаров в помещениях АЭС, индивидуальных тренировок персонала АЭС в ДАСВ может быть недостаточно. Дело в том, что в случае пожара может возникнуть необходимость следования должностных лиц из числа оперативного персонала к технологическому оборудованию АЭС для выполнения ряда работ в условиях ограниченной видимости и низкой концентрации кислорода. По ряду объективных причин персонал АЭС самостоятельно сделать этого не сможет. В подобной ситуации возникает необходимость сопровождения должностных лиц из числа персонала



звеном ГДЗС пожарно-спасательной части по охране АЭС до места назначения. Такая ситуация требует от персонала АЭС и личного состава из числа газодымозащитников оперативно слаженных и тактически правильных действий, навыки которых можно достигнуть лишь при проведении совместных тренировок на базе УТК(П) [244].

При организации подобного рода тренировок руководителю занятия необходимо определить его цели и маршруты, при прохождении которых будут решаться учебно-тренировочные задачи по достижению поставленных целей. При моделировании ситуаций особое внимание следует обращать на включение в тренировку следующих элементов [217]:

- проведение эвакуации людей;
- проведение аварийно-спасательных и аварийно-восстановительных работ;
- тушение пожара первичными средствами пожаротушения.

Целесообразно формировать совместное звено из расчета трех газодымозащитников из числа личного состава пожарно-спасательного подразделения по охране АЭС и одного человека из числа оперативного персонала АЭС. Направляющим и замыкающим совместного звена ГДЗС должны быть газодымозащитники пожарно-спасательного подразделения по охране АЭС. Модули и маршруты для их прохождения участниками тренировки необходимо определять руководителю тренировки исходя из тактического замысла практического занятия, его целей и учебно-тренировочных задач. В ходе проведения тренировки руководителю занятия необходимо тщательно следить за соблюдением требований безопасности, самочувствием участников тренировки и принимать, при необходимости, экстренные меры по оказанию первой помощи.

Решение учебных задач и отработку упражнений необходимо проводить в строгой последовательности, определенной руководителем занятия, переходя от легких и простых к более трудным и сложным элементам с постепенным увеличением физических нагрузок. Маршруты следования звена при совместных тренировках по сравнению с индивидуальной тренировкой персонала АЭС рекомендуется усложнять.

В ходе подобного рода тренировок участники смогут отработать следующие навыки совместных действий оперативного персонала АЭС и личного состава ФПС:

– отработка звеном ГДЗС (в составе с оперативным персоналом) действий по поиску и эвакуации «пострадавшего» в задымленной зоне;

– отработка звеном ГДЗС действий по доставке должностного лица из числа оперативного персонала к месту аварии (пожара) для проведения аварийно-восстановительных работ;

– отработка газодымозащитниками действий при обнаружении неисправности в дыхательном аппарате оперативного персонала АЭС.

Настоящие рекомендации по подготовке оперативного персонала к действиям при пожарах в помещениях АЭС использованы при разработке нормативного документа АО «Концерн Росэнергоатом» – «Методические рекомендации по организации тренировок» [245], которые используются в настоящее время на всех действующих атомных станциях России.

Проведение периодических тренировок в непригодной для дыхания среде для поддержания высокого уровня навыков пожарных и спасателей требует наличия теплодымокамер (далее – ТДК) в расположении подразделения или доставки тренирующихся к уже имеющимся ТДК на территории населенного пункта. Данная схема приемлема для крупных населенных пунктов, где частота работы в непригодной для дыхания среде зачастую превышает установленную периодичность тренировок.

Иное положение с подготовкой к работе в непригодной для дыхания среде обстоит в населенных пунктах, имеющих одно или два пожарных подразделения. Создание и содержание ТДК в соответствии с установленными требованиями достаточно затратно, а практика работы в реальных условиях зачастую недостаточна. Так, значительная часть действий по тушению пожаров в зданиях и сооружениях (внутренних пожаров, пожаров в ограждениях) выполняется личным составом пожарной охраны в условиях задымления (в среде непригодной для дыхания). Ежегодно в стране территориальными подразделениями пожарной охраны с использованием СИЗОД тушится более 40000 пожаров, и частота использования СИЗОД на

пожарах год от года возрастает (см. главу 1). Поэтому на такие, казалось бы, абстрактные понятия, как успех и качество тушения пожара, которые приводят к весьма объективным значениям результата пожара (материальный ущерб, число погибших и травмированных), непосредственное влияние оказывает комплекс оперативно-тактических навыков работы личного состава подразделений пожарной охраны в условиях задымления.

В целях формирования в системе пожаротушения оперативно-тактических навыков личный состав подразделений пожарной охраны проходит профессиональную подготовку. Систему профессиональной подготовки в соответствии с Порядком подготовки личного состава пожарной охраны [246] можно представить в следующем виде (рисунок 4.20).

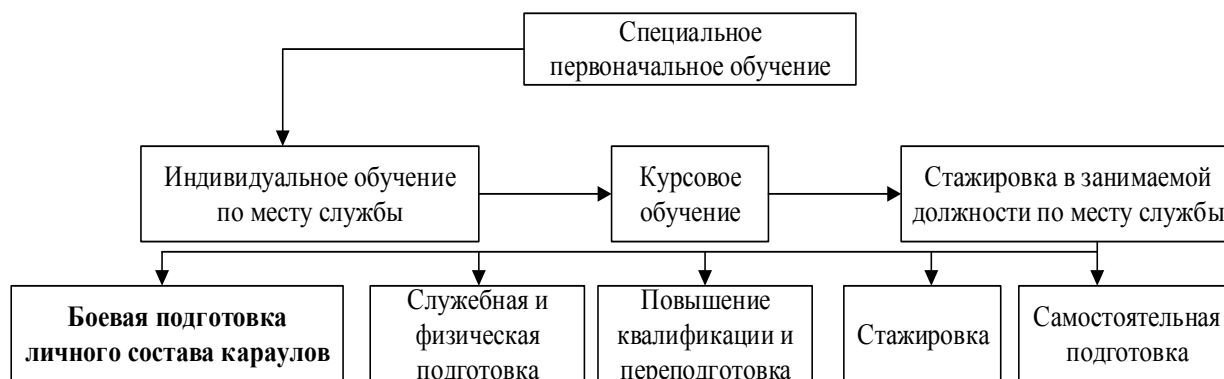


Рисунок 4.20 – Система профессиональной подготовки личного состава пожарной охраны

Перед выполнением обязанностей вновь прибывшее лицо (кандидат на должность в подразделении пожарной охраны) проходит профессиональную подготовку, которая включает в себя три последовательных этапа (рисунок 4.20). После прохождения стажировки (пять дежурств) и успешной сдачи экзамена кандидат допускается к непосредственному исполнению должностных обязанностей соответствующим приказом и проходит другие формы подготовки в соответствии с планами профессиональной подготовки.

Блок, выделенный на рисунке 4.20, имеет наибольшее значение в рассматриваемом вопросе, так как именно в рамках боевой подготовки личного состава дежурных смен (караулов), личный состав из числа газодымозащитников поддерживает и совершенствует навыки по работе в среде, непригодной для дыхания.

Важно отметить, что в настоящее время отсутствует нормативный документ, определяющий конкретные требования к тренировкам газодымозащитников. В связи с этим, при проведении такого рода практических занятий руководствуются «Методическими рекомендациями по организации и проведению занятий с личным составом ГДЗС ФПС МЧС России» [247]. Данные рекомендации определяют следующие виды тренировок газодымозащитников:

- на свежем воздухе (один раз в месяц);
- на свежем воздухе при проведении пожарно-тактических учений и занятий по решению пожарно-тактических задач (один раз в месяц);
- в зоне с непригодной для дыхания средой (ТДК) (один раз в квартал);
- на огневой полосе психологической подготовки (далее – ОППП) (не менее двух раз в год, соответственно в зимний и летний периоды).

Наиболее эффективными тренировками, с точки зрения тушения пожара, являются занятия в ТДК и на ОППП. Цель такого рода тренировок – выработка у газодымозащитника психофизиологической и морально-волевой готовности к действиям по тушению пожара в среде, непригодной для дыхания, и в условиях повышенной температуры. Данные виды тренировок требуют больших ресурсов – зданий, сооружений и оборудования (учебных объектов). В то же время, оснащение подразделений пожарной охраны учебными объектами не является удовлетворительным. Приблизительно, соотношение числа имеющихся учебных объектов к требуемому равно  $\frac{1}{2}$ . Следовательно, необходимо закупить, построить, соорудить еще столько же, сколько имеется [248–250]. Доведение числа учебных объектов до нормативного в течение короткого времени маловероятно. Выход из данной ситуации позволит найти оптимизация данного направления деятельности применением менее затратных способов подготовки. В настоящее время рассматриваемые учебно-тренировочные объекты могут быть в двух вариантах исполнения – стационарные или мобильные (рисунок 4.21).



Учебно-тренировочный пожарный полигон [248]



Учебно-тренировочный комплекс «Огневой дом» [249]



Мобильная теплодымокамера ПТС «Грот» [249]



Мобильный передвижной огневой тренажер [251]

Рисунок 4.21 – Некоторые виды учебно-тренировочных комплексов

Оснастить местные и территориальные пожарно-спасательные гарнизоны стационарными учебными объектами в полном масштабе будет весьма затратным способом выхода из ситуации. А вот оснащение их мобильными учебно-тренировочными комплексами в результате научно-обоснованного подхода к данной проблеме будет являться наиболее оптимальным способом. Детальное изучение особенностей того или иного пожарно-спасательного гарнизона позволит построить организационно-управленческую модель, позволяющую определить минимально необходимое количество тренажеров, их вариации и логистику организации тренировок на территориях местных гарнизонов.

Наиболее наглядно это можно продемонстрировать на примере организации тренировок газодымозащитников при помощи передвижного огневого тренажера.

Огневые тренажеры контейнерного типа являются эффективным средством психофизической и профессиональной подготовки, позволяющим отрабатывать задачи, связанные с работой в ограниченном пространстве при высокой температуре, наблюдением за термодинамическими процессами на имитируемом пожаре в замкнутом пространстве, организацией дымоудаления и другие.

Огневой тренажер представляет собой металлический контейнер с расположенным в передней части отсеком для проведения пожаротушения и наблюдения за развитием пожара – рабочим отсеком, а также расположенного в задней части отсека места для горючей загрузки – огневого отсека. Для создания наилучших

условий демонстрації стадій розвитку пожеги між робочим отсеком і огневим отсеком встановлюється сдвижна стінка. При проведенні обробки прийомів тушення пожеги і дымоудалення ця стінка збирається. Тренажер дозволяє спостерігати різні стадії пожеги (взгорання, «дыхание», повне горіння, тління) для вибору найбільш підходящої техніки тушення. При цьому можна обробляти основні прийоми робіт по тушенню пожеги: дії у входу, просування в умовах високих температур і обмеженої видимості, прийоми роботи со стволом по тушенню очага пожеги і дымоудаленню.



Рисунок 4.22 – Горючая нагрузка, ее горение и контроль воздействия температуры при проведении тренировки на огневом тренажере



Рисунок 4.23 – Фрагменты проведения тренировки на огневом тренажере

Для того, чтобы придать огневому тренажеру наибольшую функциональность и создать при тренировках условия, приближенные к реальным, они оборудуются на базе длинномерных полуприцепов (трейлеров) и транспортируются седельными тягачами с соответствующими прицепными устройствами. Они оборудуются системами генерации дыма, световых и звуковых эффектов, в них предусматривается возможность изменения планировки и препятствий. Для развития силы и выносливости в условиях повышенных температур выделяются помещения для теплокамер, в которых применяются специальные тренажеры (беговая дорожка, бесконечная лестница, различные эргометры).

Общим недостатком всех мобильных полигонов является ограниченное пространство, которое не достигает объема реально задымляемых при пожарах зданий и сооружений, а следовательно, не позволяет тренировать умение ориентироваться в непригодной для дыхания среде большой протяженности. В настоящее время использование мобильных полигонов на базе трейлеров сдерживают такие сложности как въезд, разворот и размещение на территории пожарных частей длинномерного транспортного средства, необходимость закупки наряду с прицепом-полигоном седельного тягача и содержания водителей для него.

Для устранения этих сложностей тренажер оборудован на грузовом прицепе, который можно транспортировать даже пожарным автомобилем, причем сам прицеп выполнен таким образом, что на месте тренировки он трансформируется в помещение, по объему не уступающее существующим мобильным полигонам на длинномерных трейлерах. Это позволяет разместить тренажер на территории пожарной части и организовать его применение силами одного человека – мастера ГДЗС. Для обеспечения обслуживания и зарядки средств защиты органов дыхания после тренировок может быть предусмотрена установка проверочных приспособлений и воздушного компрессора. В транспортном положении внешние размеры огневого тренажера не выходят за пределы прицепа и не превышают разрешенные габариты транспортных средств.

В качестве примера рассмотрим территориальный пожарно-спасательный

гарнизон Республики Карелия. Площадь Карелии – 180,5 тыс. кв. км (1 % территории Российской Федерации). Протяженность территории республики с севера на юг достигает 660 км. С запада на восток по широте г. Кеми протяженность составляет 424 км. В состав территориального пожарно-спасательного гарнизона входит 18 местных гарнизонов, из них 6 под охраной ФПС МЧС России и 12 – противопожарной службы субъекта.

В сфере повышенного внимания территориального гарнизона находятся вопросы развития и совершенствования объектов газодымозащитной службы. Для организации и проведения практических тренировок личного состава газодымозащитной службы имеется 6 теплодымокамер, 1 огневая полоса (1 – ТДК, 1 – передвижная дымокамера, 1 – огневая полоса, 4 – дымокамеры – используются приспособленные строения). Остро стоит вопрос о реконструкции и строительстве тренировочных комплексов ГДЗС (теплодымокамер, огневых полос). Для поддержания и совершенствования навыков газодымозащитников на соответствующем уровне требуется строительство минимум пяти теплодымокамер, четырех огневых полос (огневых симуляторов), реконструкция и переоборудование одной теплодымокамеры.

Для практических тренировок газодымозащитников используются 5 стационарных огневых симуляторов (на базе учебного пункта г. Петрозаводска, г. Питкяранта, Костомукшского ГО, г. Сегежа и п. Поросозеро), 1 передвижная теплодымокамера, 1 передвижной огневой симулятор на базе прицепа для организации тренировок в отдаленных подразделениях. Тренировки газодымозащитников проводятся в соответствии с планом профессиональной подготовки. Организацию тренировок газодымозащитников, с учетом предъявляемых требований, можно назвать высокой лишь в четырех местных пожарно-спасательных гарнизонах из 18. Местные гарнизоны г. Петрозаводска, г. Кондопога, Прионежского района и Пряжинского района характеризуются высоким уровнем возможностей по организации тренировочных занятий в сравнении с другими гарнизонами. А ведь на формирование профессионального навыка, кроме тренировочных занятий, оказывает влияние и показатель практической работы (рисунок 4.24).



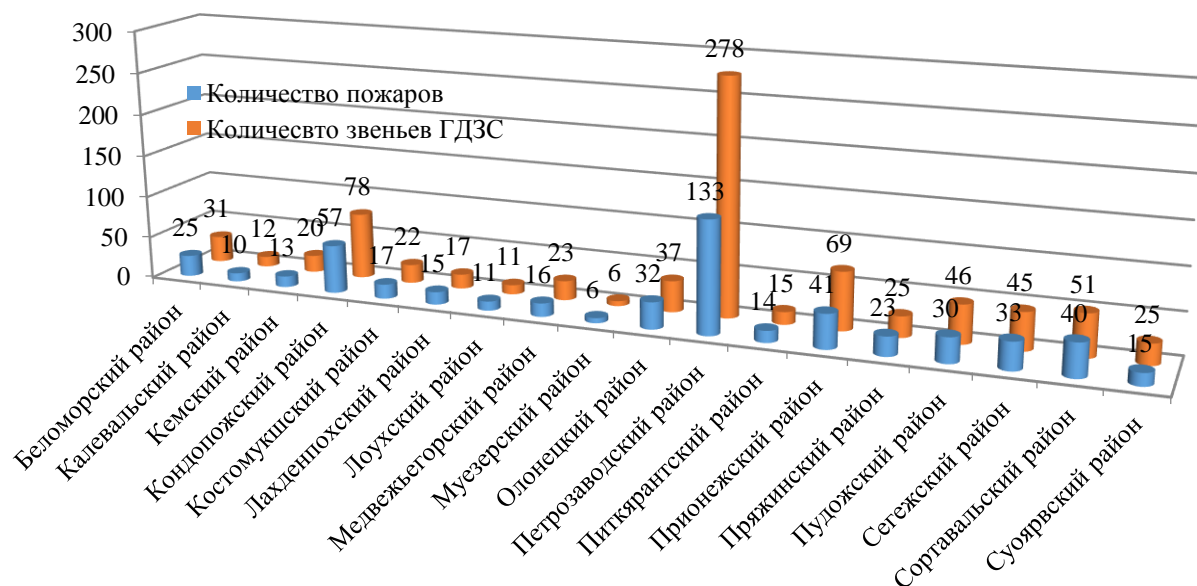


Рисунок 4.24 – Усредненный показатель работы звеньев ГДЗС на пожаре в Республике Карелия

Проведенный анализ показывает, что значительная часть территориального гарнизона не имеет возможности поддерживать свои профессиональные навыки по работе в НДС на должном уровне ввиду минимальных показателей тренировочных занятий и практической работы, соотношение которых является весьма важным.

На рисунке 4.24 приведен сравнительный анализ усредненных показателей вышеупомянутых величин. Рисунок показывает на тенденцию к наиболее высоким показателям деятельности ГДЗС в центральной части региона. В целях планирования и организации тренировок предлагается провести градацию по общему показателю практической работы ГДЗС соответствующих гарнизонов, данным показателем будет являться количество пожаров, потушенное с привлечением ГДЗС (линия 1, рисунок 4.25). Данная градация, проведенная на этапе мониторинга-планирования, позволит выделить местные пожарно-спасательные гарнизоны, вопрос о практических навыках личного состава которых является наиболее приоритетными, и включает в себя 3 уровня: зеленый, желтый и красный, соответственно, хороший, удовлетворительный и критически низкий уровень подготовки. Вместе с этим, схожую тенденцию имеет и показатель среднего времени работы одного звена ГДЗС в квартал (линия 2, рисунок 4.25).

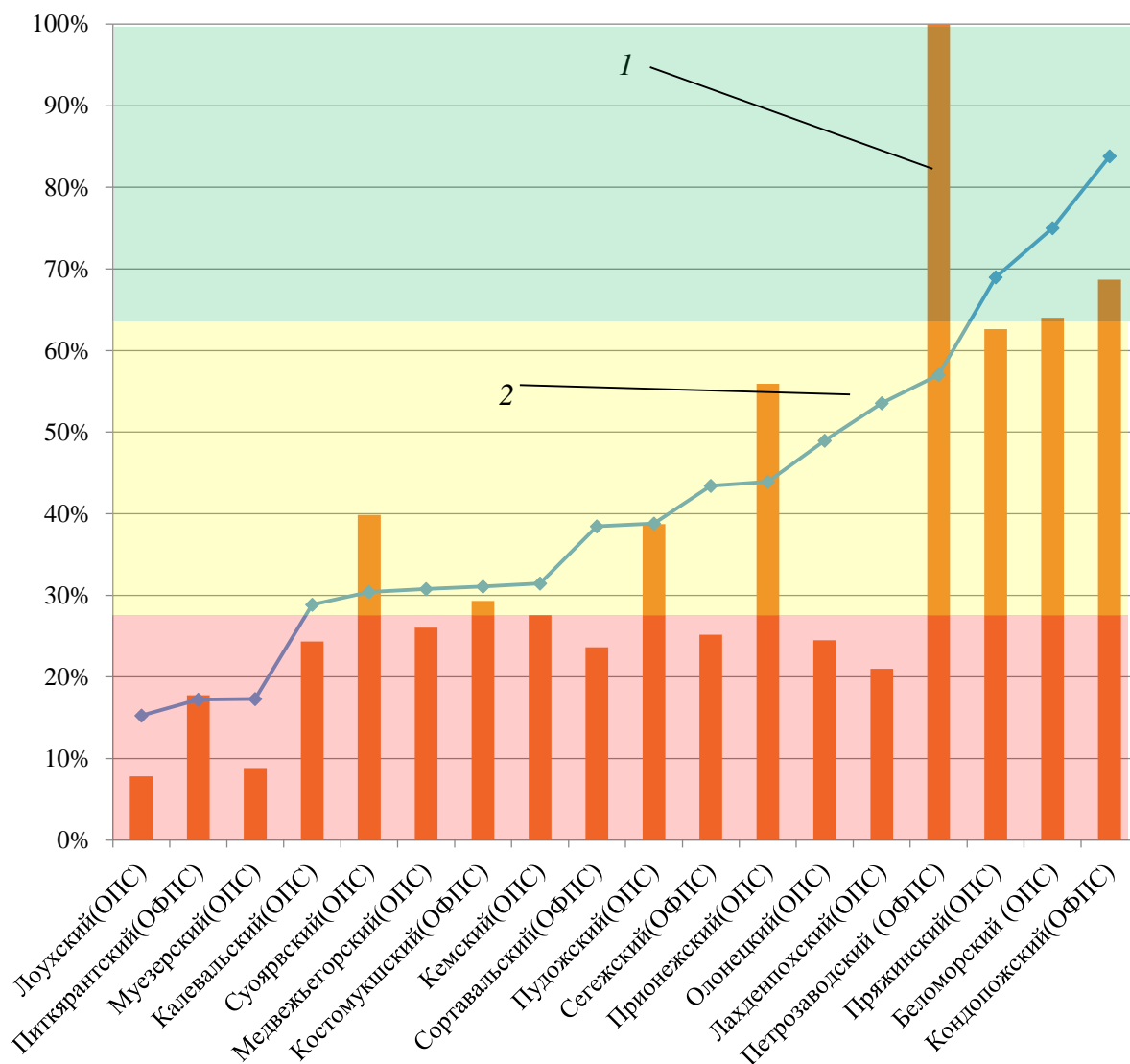


Рисунок 4.25 – Сравнительный анализ деятельности местных пожарно-спасательных гарнизонов республики Карелия

1 – среднее количество пожаров, приходящихся на одно звено ГДЗС в квартал (100 % – 1 пожар); 2 – среднее время работы на пожаре одного звена ГДЗС в квартал (100 % – максимальное время работы)

Следующий этап будет заключаться в решении задач по локализации зон и выявлению территорий местных пожарно-спасательных гарнизонов с незначительным показателем работы в непригодной для дыхания среде, что также оказывает сильное влияние на формирование профессионального навыка (рисунок 4.26). В результате анализа видно, что в зону повышенного внимания вошли Питкярантский, Суоярвский, Медвежьегорский, Муезерский, Костомукшинский, Калевальский, Кемский и Лоухский местные пожарно-спасательные гарнизоны.

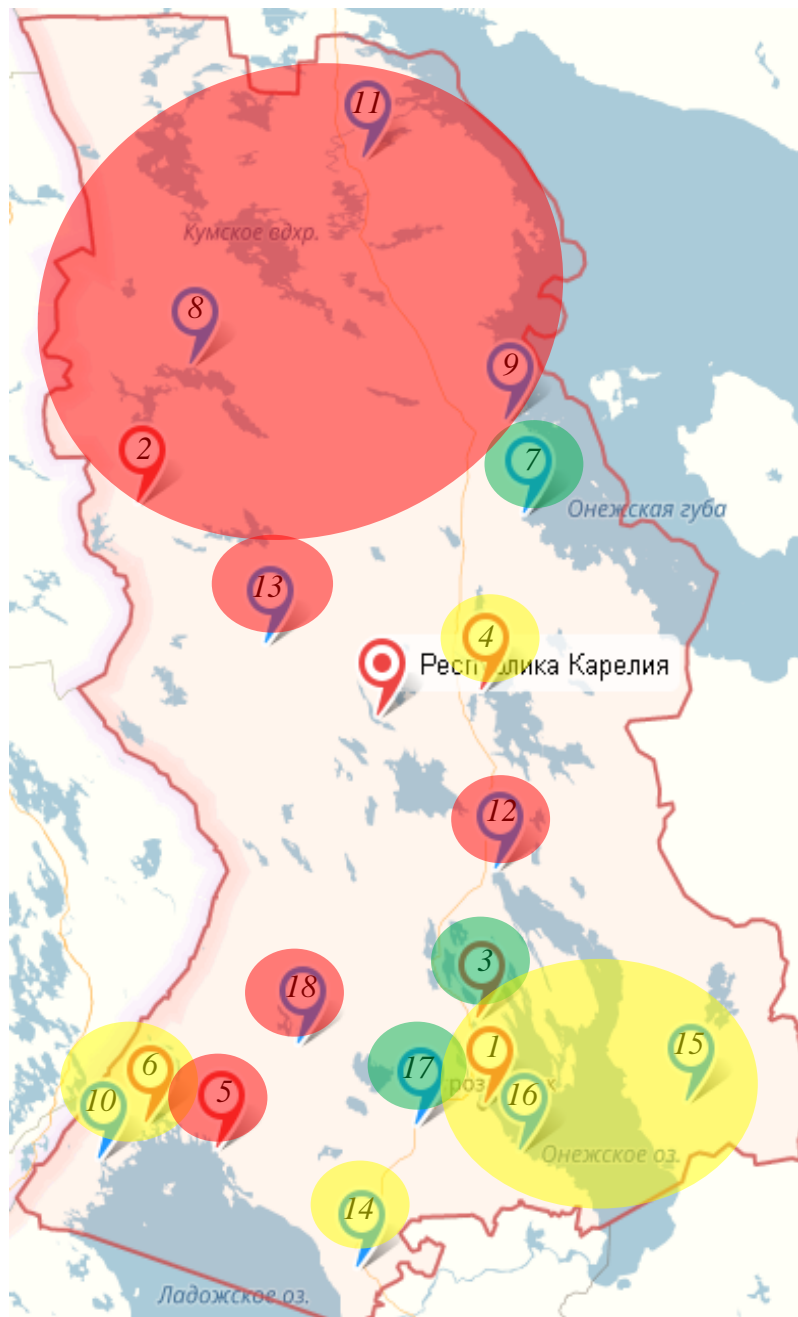


Рисунок 4.26 – Критические зоны с низким уровнем профессионального навыка газодымозащитников местных пожарно-спасательных гарнизонов (выделено красным)

Далее происходит моделирование маршрута движения мобильного учебно-тренировочного комплекса для организации и проведения тренировок личного состава наименее подготовленных и, как правило, наиболее удаленных местных пожарно-спасательных гарнизонов (рисунок 4.27). Для более детального моделирования движения мобильного комплекса и точного планирования времени и затрат рекомендуется использовать современные системы навигации.



Рисунок 4.27 – Приблизительный маршрут движения мобильного учебно-тренировочного комплекса в республике Карелия

В заключение остается изучить необходимость времени нахождения мобильного комплекса на территориях местных пожарно-спасательных гарнизонов с учетом особенностей работы и тренировок соответствующих пожарно-спасательных подразделений, размещенных на рассматриваемой территории, и спланировать план тренировки газодымозащитников на будущий год.

В течение месяца при помощи такого тренажера (с учетом четырехсменного режима несения службы) можно организовать проведение тренировок в десяти пожарных частях, а с учетом сбора двух дежурных караулов в один день – в двадцати.

Применительно к большинству субъектов РФ один подобный тренажер может обеспечить ежеквартальные тренировки в непригодной для дыхания среде подразделений пожарной охраны районных центров субъекта. Присутствие во время тренировок в каждом подразделении представителя, сопровождающего тренажер позволит повысить их качество, быстрее внедрять передовые методы и приемы подготовки и даст представление об уровне подготовленности газодымозащитников.

Предложенный подход к организации и проведению тренировок работы в НДС с личным составом местных пожарно-спасательных гарнизонов позволит выработать ряд управленческих решений, направленных на:

- выявление наиболее «слабых» в плане профессиональной подготовки газодымозащитников, требующих большего внимания;
- оптимизацию системы профессиональной подготовки на основе особенностей деятельности местных гарнизонов;
- минимизацию расходов на организацию и проведение тренировок в результате научно-обоснованного подхода;
- создание «гибкой» системы организации тренировок, позволяющей оттапливаться от обоснованной необходимости.

Для решения этой проблемы существует опыт создания мобильных полигонов для обучения пожарных и спасателей работе в непригодной для дыхания среде при тушении пожара в закрытых помещениях в условиях высоких температур [251]. При этом достигается:

- повышение психологических и психофизиологических качеств газодымозащитников в условиях моделируемого реального пожара;
- умение оценивать стадии пожара в процессе его развития и обработка действий по управлению моделируемым пожаром;
- отработка действий звена ГДЗС по тушению моделируемого пожара в закрытых объемах при высоких температурах (600–800 °С) с применением тонкораспыленной воды;

- отработка действий звена при входе в помещение, передвижения внутри помещения и тактические приемы применения ствола;
- способы предотвращения пиролизного взрыва (вспышки продуктов пиролиза);
- отработка способа дымоудаления с применением ствола-распылителя звеном ГДЗС из помещения в процессе тушения пожара;
- практическая отработка вопросов техники безопасности при работе звена ГДЗС в условиях повышенных температур.

## ГЛАВА 5

### РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗВИВШИХСЯ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

#### 5.1 Научные основы и моделирование тактико-технических возможностей мобильных средств пожаротушения

На объектах энергетики наиболее опасны и вероятны пожары при возгорании следующей пожароопасной нагрузки [9–12]: горючие жидкости, кабельная продукция и взрывоопасные газы (например, метан и водород). Как было указано в параграфе 2.3, использование ВСМФС позволяет тушить такие пожары объемным способом. Эксперименты, проведенные по использованию ВСМФС в замкнутых объемах, и практика использования автомобиля пожарного многоцелевого (АПМ) подтверждают эффективность заполнения больших объемов огнетушащей концентрацией ВСМФС со скоростью до  $5 \text{ м}^3/\text{с}$  при подаче  $1 \text{ кг}/\text{с}$  недогретой воды.

Время заполнения ВСМФС внутренних объемов зависит от соотношения между паровой и капельной фазами воды после взрывного вскипания, а также от давления и температуры внутри заполняемого объема. Расчет соотношения между паровой и капельной фазами воды, истекающей из ствола-распылителя, зависит от соотношения между температурой и давлением недогретой воды перед стволом-распылителем, а также его конструкции.

Аналитическими и экспериментальными исследованиями установлено, что могут быть реализованы следующие соотношения между паровой и капельной фазами воды, а также размеры капель воды: массовая доля пара – от 10 до 30% массы воды перед взрывным вскипанием; размер капель воды – от 0,01 до 10 мкм [110–112]. Причем в отличие от механического, традиционного одномодального распределения размеров капель воды (технологии тонкораспыленной воды - ТРВ)



при реализации взрывного вскипания позволяет получить бимодальное распределение капель по размерам (рисунки 5.1–5.6).

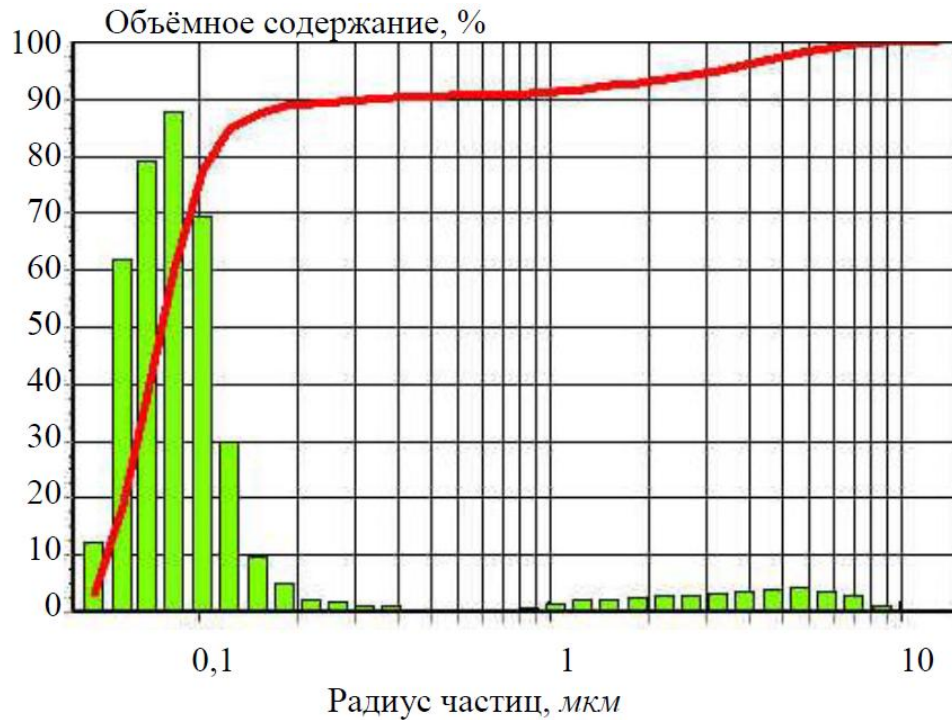


Рисунок 5.1 – Распределение капель при подаче ВСМФС с использованием насадка-распылителя вида «сопло Лавалья» при температуре 170 °С

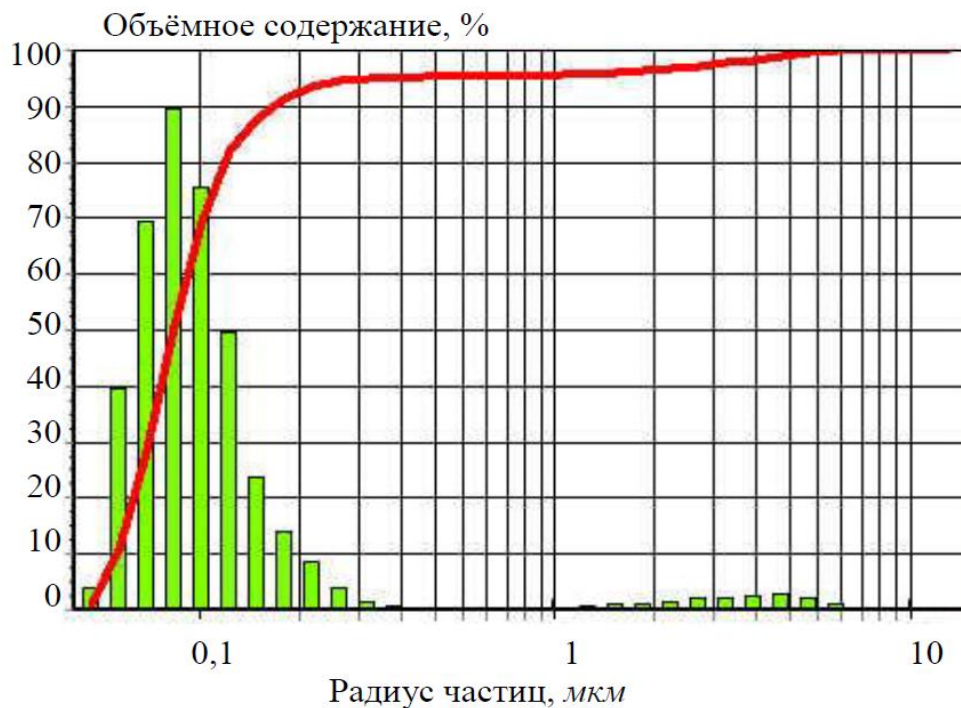


Рисунок 5.2 – Распределение капель при подаче ВСМФС с использованием насадка-распылителя вида «сопло Лавалья» при температуре 200 °С



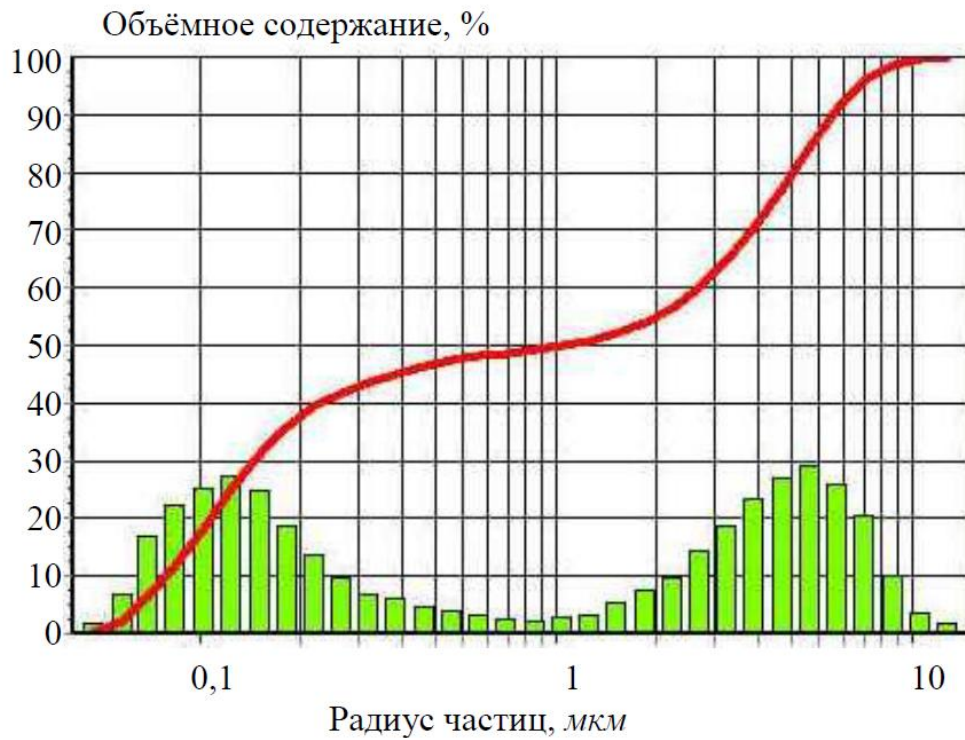


Рисунок 5.3 – Распределение капель при подаче ВСМФС с использованием насадка-распылителя вида «сопло Лавалья с цилиндрической частью» при температуре 170 °С

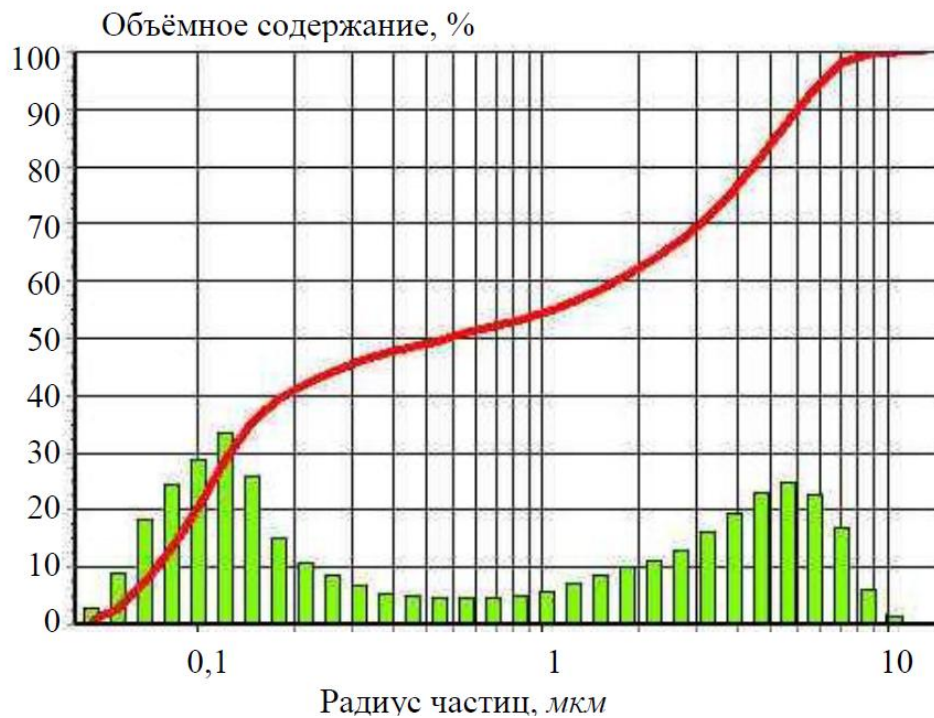


Рисунок 5.4 – Распределение капель при подаче ВСМФС с использованием насадка-распылителя вида «сопло Лавалья с цилиндрической частью» при температуре 200 °С

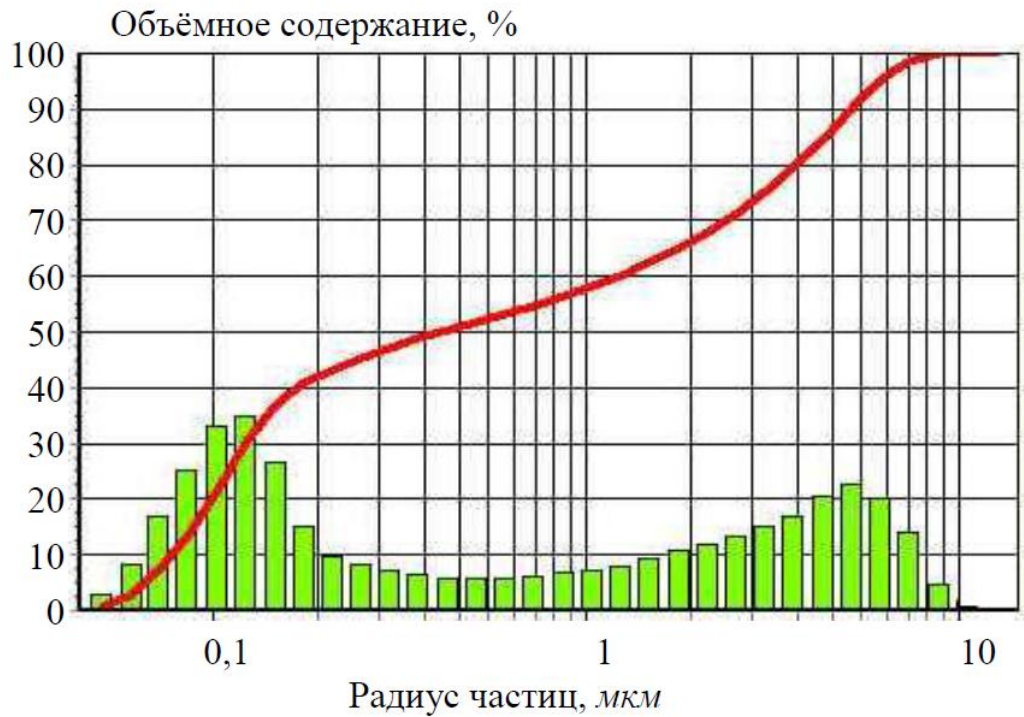


Рисунок 5.5 – Распределение капель при подаче ВСМФС с использованием насадка-распылителя вида «шайба с острой кромкой» при температуре 170 °С

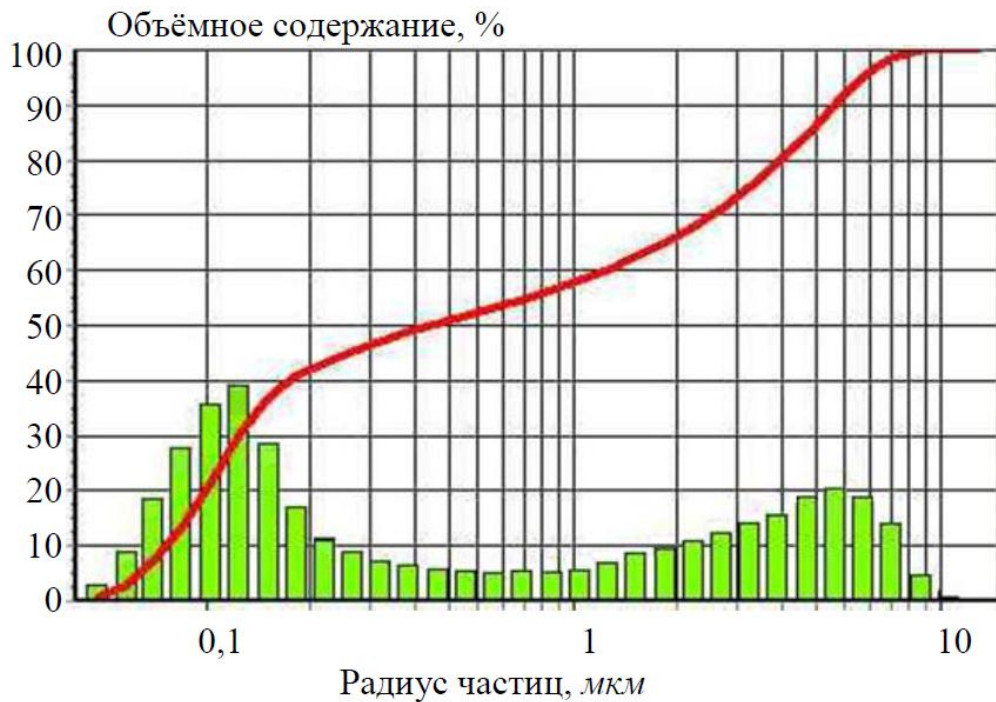


Рисунок 5.6 – Распределение капель при подаче ВСМФС с использованием насадка-распылителя вида «шайба с острой кромкой» при температуре 200 °С

Из графиков, представленных на рисунках 5.1–5.6, видно, что бимодальное распределение капель ВСМФС по размеру сильно зависит от конструкции и типа сопла. Сопло Лаваля дает максимальное соотношение количества частиц малого

радиуса (в среднем 0,07 мкм) к большему (в среднем 7 мкм), оценочно на семь порядков. Шайба с острой кромкой и сопло Лаваля с цилиндрической частью дает отношение частиц с малым радиусом к частицам большим – лишь на пять порядков [111].

При этом размеры капель большого диаметра одинаковы для всех используемых в эксперименте насадков-распылителей (7 мкм в среднем), между тем как размер малых капель зависит от вида насадка: для сопел Лаваля в обоих случаях размер малых капель составляет в среднем 0,07 мкм, а для насадкараспылителя в виде шайбы с острой кромкой – 0,17 мкм. Вышесказанное приводит к следующим выводам:

- на распределение размера капель влияет вид насадка-распылителей (процент малых капель выше при использовании сопла Лаваля без цилиндрической части);

- на малый размер капель влияет вид насадка-распылителя (размер меньше при использовании сопла Лаваля, как с цилиндрической частью, так и без нее);

- увеличение температуры подаваемой воды дает некоторый сдвиг в сторону увеличения относительного количества капель с малым радиусом, эффект наиболее выражен для насадка-распылителя в виде сопла Лаваля;

- увеличение температуры ВСМФС дает большее паросодержание в струе.

Особо следует отметить, что ранее распространенное мнение о том, что минимальный размер капель при одинаковой температуре воды может быть получен с использованием насадка-распылителя в виде шайбы с острой кромкой, оказалось неверным. Предполагаемый механизм явления заключается в конденсации капель из пара после взрывного вскипания внутри «протяженных» сопел, поскольку конденсированные из пара капли по своим размерам оказываются меньше, чем капли, полученные в результате взрывного вскипания. На данном этапе аналитическое описание процесса одновременного образования капель в результате взрывного вскипания и в результате образования из пара отсутствует (и, исходя из сложности описания турбулентных сред в экстремальных условиях, будет отсутствовать долгое время), а экспериментально отличить конденсированные капли от остальных

практически невозможно, поэтому капли не разделяются по происхождению, тем более, что для практических целей тушения пожара происхождение капель не имеет какого-либо значения [111].

Для теоретического анализа процесса истечения перегретой воды было произведено гидродинамическое моделирование процесса истечения воды через сопло Лавалья, которое сопровождается интенсивными фазовыми переходами, что необходимо учитывать при построении расчетной модели. В результате моделирования были определены основные характеристики потока: массовые доли пара и воды, скорость, давление и реактивное усилие струи на срезе сопла.

Стационарная задача рассмотрена в трехмерной постановке. На рисунке 5.7 схематично отображена расчетная схема и граничные условия: на входе сопла задается давление, равное 2 МПа, на выходе – атмосферное давление, на остальных поверхностях – условие прилипания к твердой поверхности.

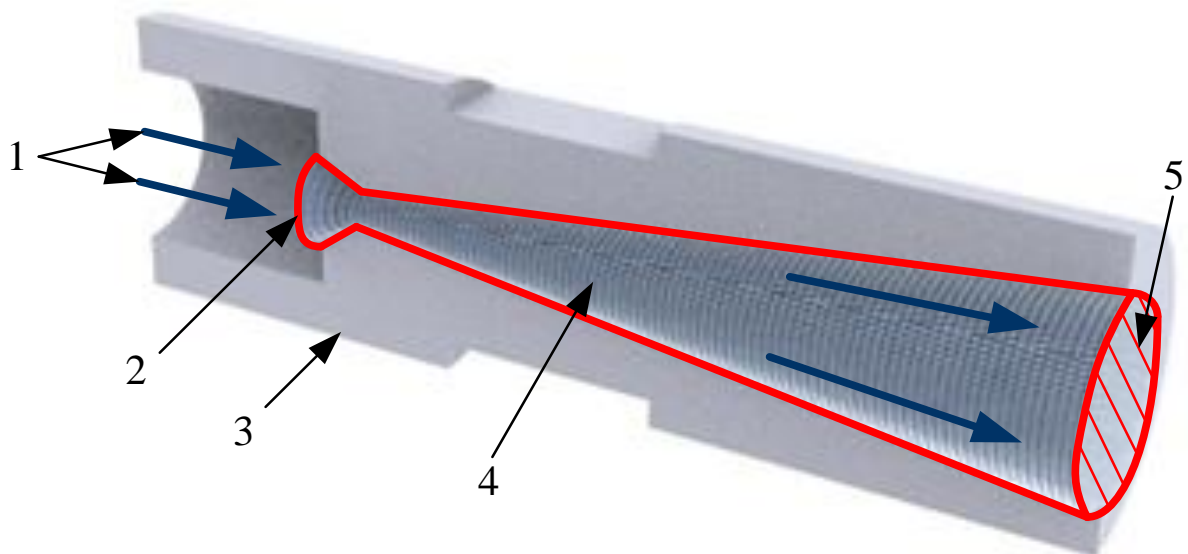


Рисунок 5.7 – Расчетная модель в сечении и граничные условия

1 – направление потока воды; 2 – входное сечение; 3 – корпус сопла Лавалья;  
4 – область моделирования; 5 – выходное сечение сопла Лавалья

Моделирование проводилось для различных значений температуры воды: от 160 до 200 °С.

В расчетной модели были приняты следующие допущения: процесс теплообмена исключен из моделирования, так как в процессе истечения воды был установ-

лен режим теплового равновесия для участка моделирования; не учитывалась шероховатость стенок; объемные силы отсутствуют. Для моделирования задачи, согласно описанной постановке, использовался программный CFD-комплекс ANSYS CFX.

В ANSYS CFX многофазные однородные потоки описываются системой уравнений:

– уравнение сохранения массы для каждой фазы:

$$\frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) = \sum_{\beta=1}^2 \Gamma_{\alpha\beta}, \quad (5.1)$$

– уравнение сохранения количества движения для смеси:

$$\frac{\partial(\rho_m U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m U \times U - \tau) = -\nabla p, \quad (5.2)$$

– уравнение сохранения объема:

$$\sum_{\alpha=1}^2 r_\alpha = 1, \quad (5.3)$$

где  $\Gamma_{\alpha\beta}$  – поток массы на единицу объема из фазы  $\beta$  в фазу  $\alpha$ ;

$r_\alpha$  – объемная доля фазы  $\alpha$ ;

$U$  – вектор скорости;

$\rho_\alpha, \rho_m$  – плотность фазы  $\alpha$  и плотность смеси, соответственно;

$p$  – давление;

$\tau$  – тензор вязких напряжений.

В ANSYS CFX для описания процесса кавитации используется уравнение Рэлея – Плессета, с помощью которого можно получить уравнение, описывающее скорость образования пара. Общее уравнение Рэлея – Плессета выглядит следующим образом:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f}, \quad (5.4)$$

где  $R_B$  – радиус пузырька;

$p_v$  – давление в пузырьке (давление насыщенных паров жидкости при данной температуре);

$p$  – давление в жидкости вокруг пузыря;

$\rho_f$  – плотность жидкости;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Пренебрегая членами второго порядка и поверхностным натяжением, уравнение принимает вид:

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}}. \quad (5.5)$$

Скорость изменения объема пузырька выглядит следующим образом (предполагается, что пузырьки имеют сферическую форму):

$$\frac{dV_B}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{4}{3} \pi R_B^3 \right) = 4\pi R_B^2 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}}. \quad (5.6)$$

Тогда скорость изменения массы пузырька можно определить следующим образом:

$$\frac{dm_B}{dt} = \rho_g \frac{dV_B}{dt} = 4\pi R_B^2 \rho_g \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}}. \quad (5.7)$$

Если известно количество пузырьков на единицу объема  $N_B$ , то можно вычислить объемную долю  $r_g$ :

$$r_g = V_B N_B = \frac{4}{3} \pi R_B^3 N_B. \quad (5.8)$$

В таком случае выражение полного массопереноса на поверхности раздела фаз на единицу объема может быть получено следующим образом:

$$\dot{m}_{fg} = N_B \frac{dm_B}{dt} = \frac{3r_g \rho_g}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}}. \quad (5.9)$$

Результаты расчета показаны на рисунках 5.8–5.16 (расчетные значения по срезу вдоль центрального сечения сопла Лаваля).

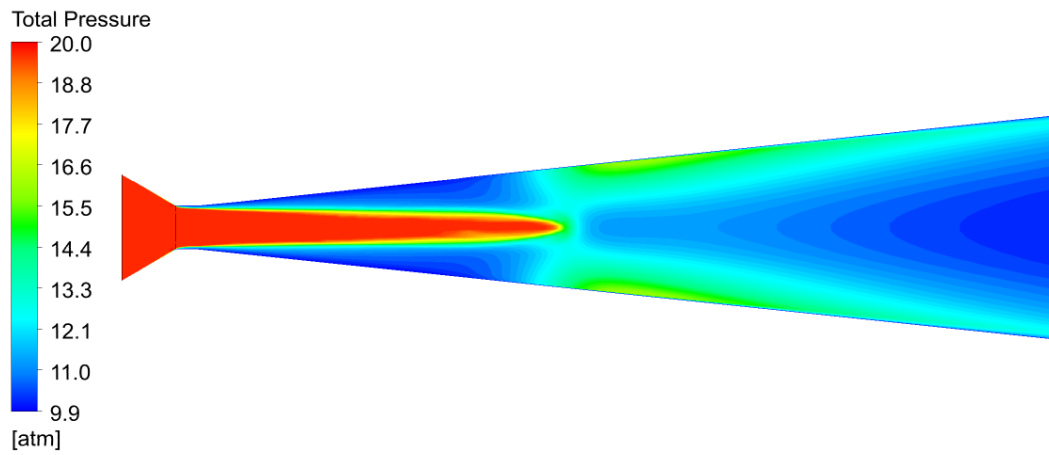


Рисунок 5.8 – Распределение полного давления вдоль центрального сечения сопла при истечении воды температурой 160 °С

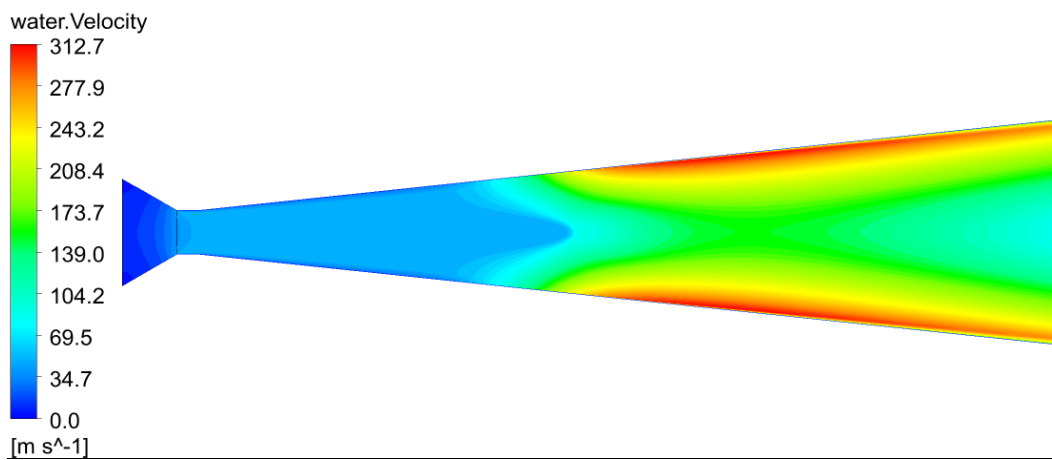


Рисунок 5.9 – Распределение скорости потока вдоль центрального сечения сопла при истечении воды температурой 160 °С

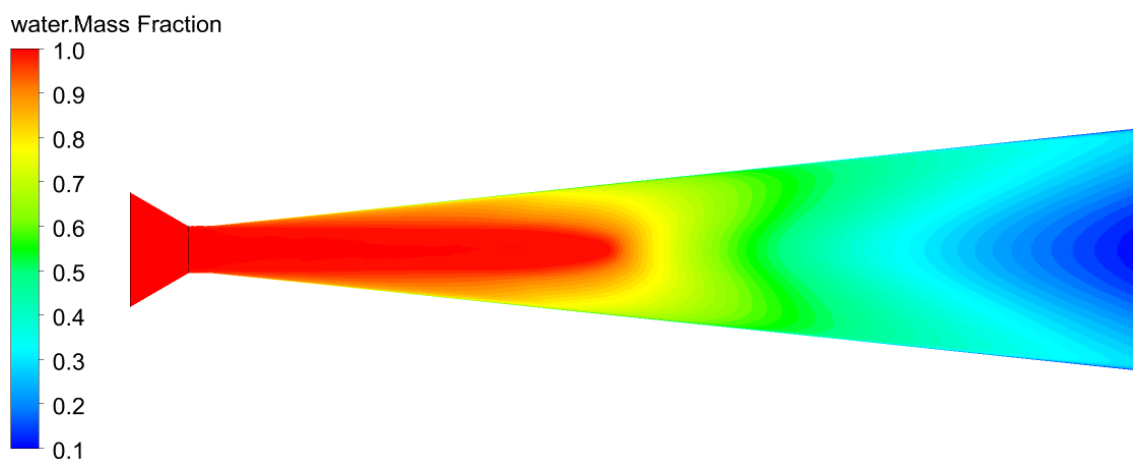


Рисунок 5.10 – Распределение массовой доли воды вдоль центрального сечения сопла при истечении воды температурой 160 °С



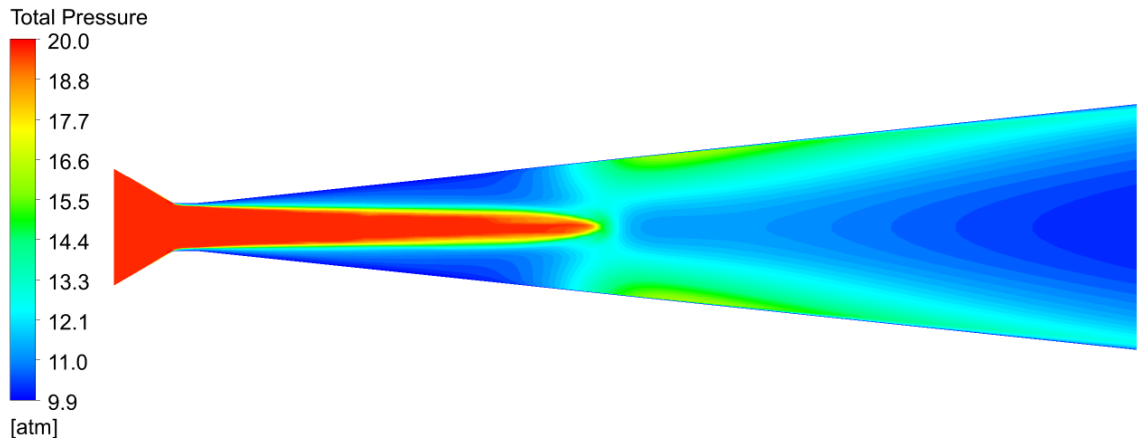


Рисунок 5.11 – Распределение полного давления вдоль центрального сечения сопла при истечении воды температурой 180 °С

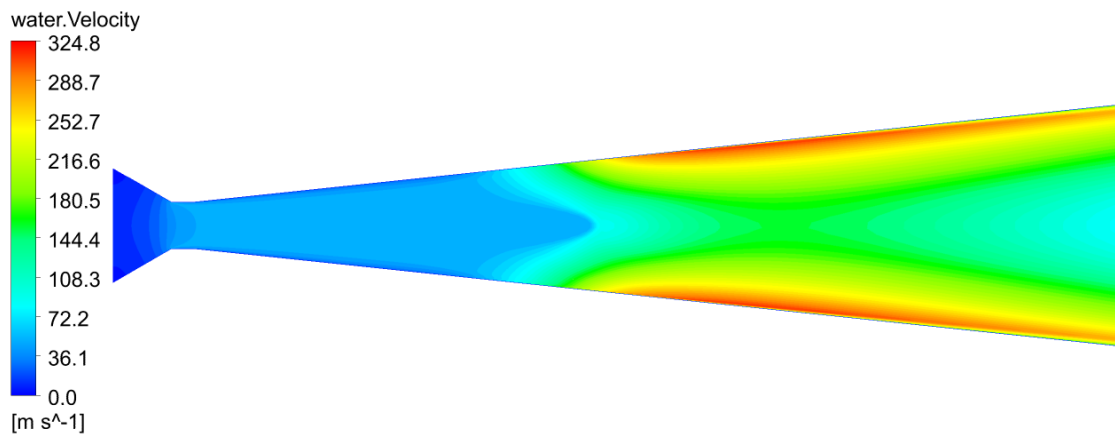


Рисунок 5.12 – Распределение скорости потока вдоль центрального сечения сопла при истечении воды температурой 180 °С

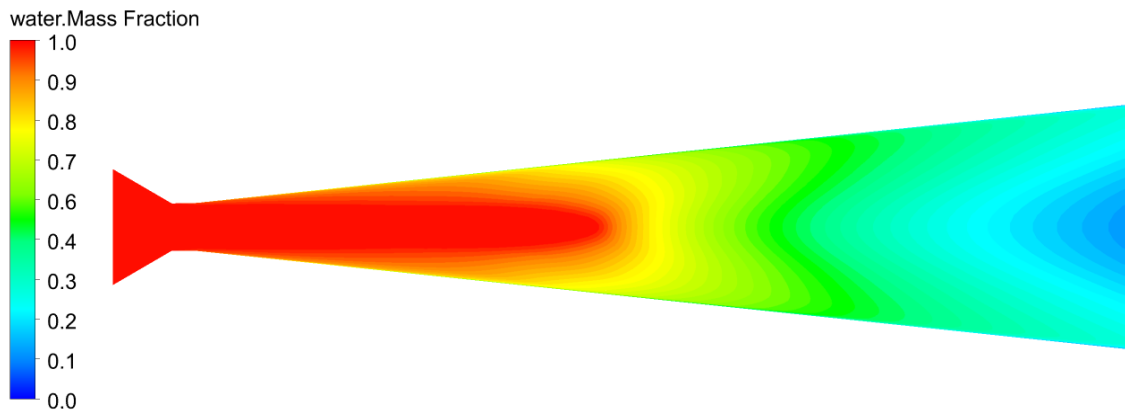


Рисунок 5.13 – Распределение массовой доли воды вдоль центрального сечения сопла при истечении воды температурой 180 °С



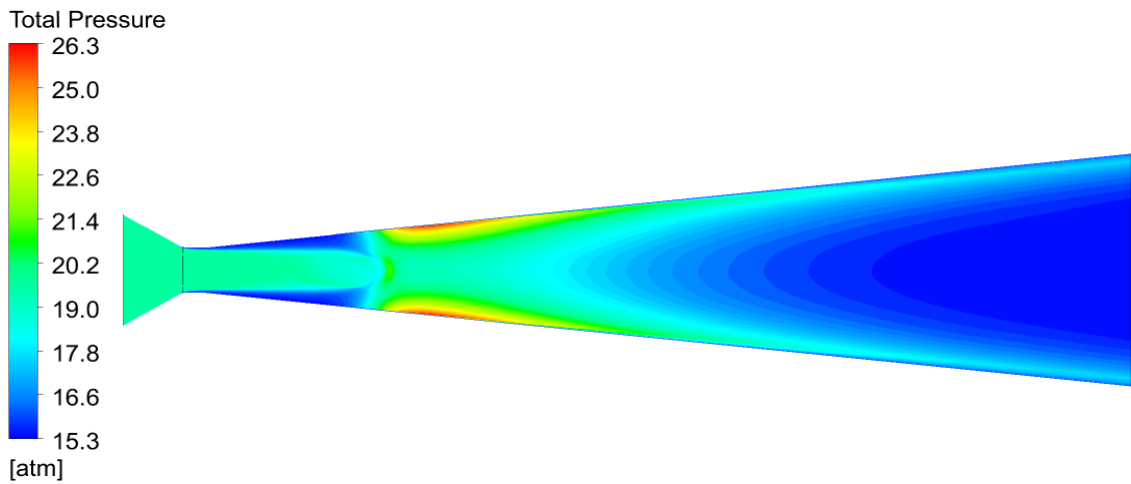


Рисунок 5.14 – Распределение полного давления вдоль центрального сечения сопла при истечении воды температурой 200 °С

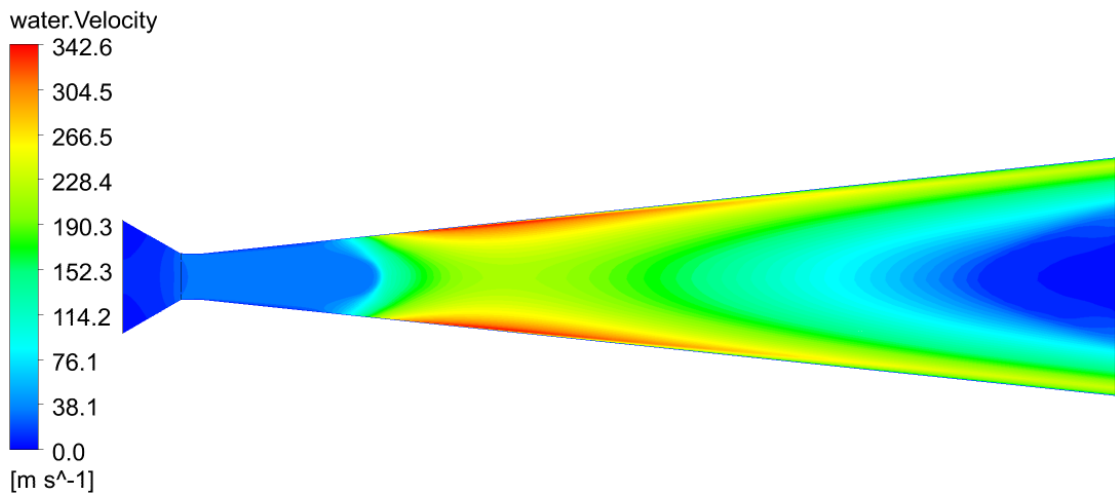


Рисунок 5.15 – Распределение скорости потока вдоль центрального сечения сопла при истечении воды температурой 200 °С

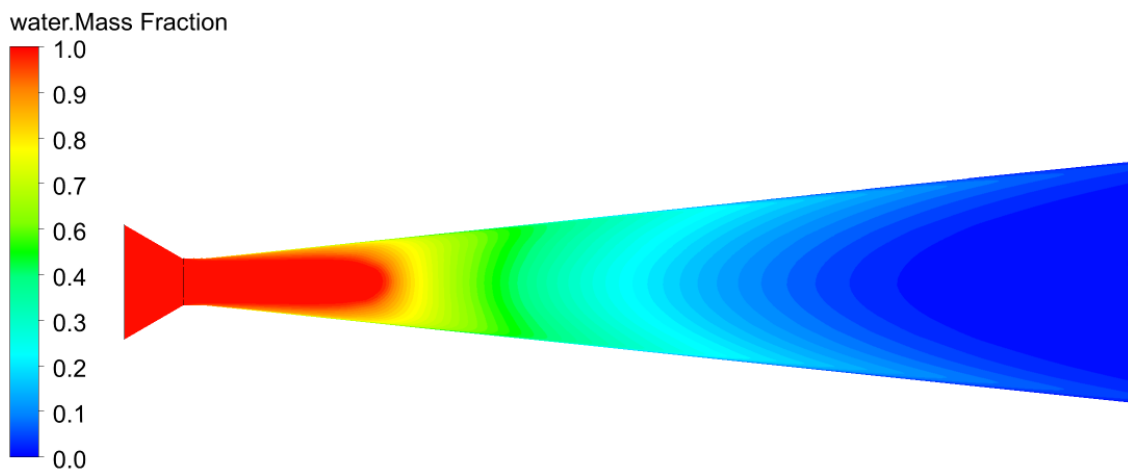


Рисунок 5.16 – Распределение массовой доли воды вдоль центрального сечения сопла при истечении воды температурой 200 °С

В таблице 5.1 представлены средние характеристики потока на выходном сечении сопла при различной температуре воды на входе в сопло.

Таблица 5.1 – Средние значения параметров потока на выходном сечении сопла

Температура, °С	Относительный недогрев воды	Массовый расход, кг/с	Скорость потока, м/с	Массовая доля воды
160	0,69	0,107	187,4	0,25
170	0,61	0,107	187,2	0,25
180	0,50	0,107	187,0	0,24
190	0,38	0,081	123,4	0,10
200	0,22	0,072	108,6	0,01

Также из приведенных аналитических и экспериментальных данных по составу и размеру капель струи ВСМФС следует, что использование ствола с насадком-распылителем с соплом Лавалья позволяет получать максимальное количество капель минимально возможного размера, чем при использовании других насадков-распылителей. Поэтому при тушении пожаров в замкнутых объемах объекта энергетики объемным способом предпочтение следует отдавать стволам-распылителям с насадком-распылителем с соплом Лавалья, так как скорость седиментации (оседания, выпадения) капель с меньшими размерами минимальна и, например, скорость оседания капель размером 20 мкм не превышает 0,01 м/с. В работах [252–254] доказано, что капли размером менее 30 мкм склонны к длительному витанию (парению) и практически не имеют скольжения относительно потока воздуха или пара. Кроме того, можно считать, что капли с размерами до 30 мкм полностью увлекаются воздушным потоком [255], [256].

Поэтому при заполнении объемов ВСМФС седиментация (оседание) капель возможна только после укрупнения капель в результате нуклеации и коагуляции при продвижении или витании капель внутри заполняемого объема – процессов, способствующих увеличению размера капель. Фактически оседание капель воды будет происходить только после того, как размеры капель воды превысят размеры необходимые для ее оседания под действием гравитационных сил (сил тяжести).

Максимальное время заполнения объема ВСМФС будет реализовано при среднеобъемных температурах меньших 100°С, так как не будет интенсивного испарения капель, образовавшихся после взрывного вскипания. При температурах

меньших  $100^{\circ}\text{C}$  важно заполнить объем ВСМФС до полной конденсации и выпадения (оседания, седиментации) капель ВСМФС.

Поэтому при заполнении объема ВСМФС важно сравнивать время, необходимое для процесса укрупнения капель до размера достаточного для седиментации, и время осаждения этих капель на горизонтальные поверхности объема со скоростью, вычисляемой по формуле:

$$V_S = \frac{2gr^2(\rho_T - \rho_B)}{9\mu}, \quad (5.10)$$

где  $\rho_T$  – плотность частицы;

$\rho_B$  – плотность среды;

$r$  – радиус капли;

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости;

$g$  – ускорение свободного падения.

В классической теории нуклеации однокомпонентной системы нуклеация рассматривается как процесс формирования критических зародышей (ядер), которые являются каплями, находящимися в нестабильном термодинамическом равновесии с пересыщенным паром. Различают гомогенную и гетерогенную нуклеацию.

В случае гомогенной нуклеации скорость нуклеации  $J$ , то есть число критических зародышей, образующихся в единицу времени в объеме  $V$  системы, есть [257]:

$$J = 4\pi R_e^2 \beta Z N^*, \quad (5.11)$$

где  $4\pi R_e^2$  – площадь поверхности критического зародыша;

$R_e$  – эквимолярный радиус капли;

$Z$  – фактор Зельдовича, учитывающий возможность испарения молекул из растущей капли;

$N^*$  – число зародышей критического размера в объеме  $V$ ;

$\beta = \frac{N_1}{V} \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi m}}$  – число ударов молекул пара о единичную поверхность за единицу времени;

$N_1$  – число молекул пара;

$k_B$  – константа Больцмана;

$T$  – температура;

$m$  – масса молекулы пара.

Число критических зародышей можно определить при равновесном распределении капель по размерам. Для определения такого распределения Рейс [258] рассмотрел ансамбль кластеров как идеальную газовую смесь. В его модели предполагается, что кластеры не взаимодействуют ни с молекулами окружающего их газа, ни друг с другом. Тогда полная статистическая сумма для системы объемом  $V$ , содержащей  $\sum_{n=2} N_n$  капель и  $N_1$  молекул пара, может быть записана следующим образом [259]:

$$Q(V) = \sum_{\{N_n\}} Q_{N_1, N_n}^{id} (V - \sum_{n=2} N_n v_n) \prod_{n=2} \frac{q_n^{N_n}}{N_n!}, \quad (5.12)$$

где  $v_n$  – объем кластера;

$Q_{N_1, N_n}^{id}$  – статистическая сумма идеального газа.

Сумма в уравнении (5.12) берется по всем распределениям  $N_n$ , для которых

$$N_1 + \sum_{n=2} nN_n = N, \quad (5.13)$$

где  $N$  – общее число молекул в системе.

Равновесное распределение по размерам находится из уравнения (5.12) с учетом (5.13) методом неопределенных множителей Лагранжа, и в результате получаем [259]:

$$N_n = q_n \exp \left\{ -\frac{1}{k_B T} (Pv_n - n\mu_V) \right\}, \quad (5.14)$$

где  $P$  – давление окружающего идеального газа.

Выражение для скорости гетерогенной нуклеации, то есть для числа критических зародышей, образующихся в единице объема за единицу времени, по аналогии с гомогенным случаем, может быть записано в виде [260], [261]:

$$J = 4\pi R_p^2 \beta n^*, \quad (5.15)$$

где  $R_p$  – радиус затравочной частицы;

$n^*$  – счетная концентрация образовавшихся на поверхности затравочных частиц линзообразных зародышей критического размера нуклеирующего вещества.

Флетчер [262] по аналогии с уравнением, полученным в рамках КТН Френкелем для случая гомогенной нуклеации, записал:

$$n^* = n_\sigma \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{k_B T}\right), \quad (5.16)$$

где вместо числа молекул-мономеров  $N_1$  он поставил  $n_\sigma$  – концентрацию затравочных частиц;

$\Delta G^*$  – свободная энергия образования критического зародыша на затравочной частице.

Выражение для свободной энергии было получено в работе [262]:

$$\Delta G^* = \frac{2\pi^* \sigma_{12}}{3} f(m, x). \quad (5.17)$$

Скорость конденсационного роста мелкой ( $r < 10^{-2}$  см) неподвижной капли воды описывается уравнением [263]:

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r \varepsilon D \Delta C_r, \quad (5.18)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе,

$$\varepsilon = \frac{B}{B+D/r}, \quad \Delta C_r = C - C_r, \quad B = \alpha \sqrt{\frac{RT}{2\pi\mu}}, \quad (5.19)$$

где  $C$  – концентрация пара в окружающей среде на большом расстоянии от капли;

$C_r$  – равновесная концентрация пара у поверхности капли;

$\alpha$  – коэффициент конденсации;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$\mu$  – молекулярный вес воды;

$T$  – температура окружающей среды.

Переходя к парциальным упругостям водяного пара и учитывая, что в общем случае капли в струе ВСМФС является каплями растворов, представим  $\Delta C_r$  как:

$$\Delta C_r = \frac{\mu e(T)}{RT} - \frac{\mu E_r(T_r)}{RT_r}, \quad (5.20)$$

где  $E_r(T_r)$  – равновесная упругость пара над поверхностью капли при температуре капли  $T_r$ .  $E_r(T_r)$  можно представить в виде:

$$E_r(T_r) = E_\infty(T_r) \left(1 + \frac{2\sigma\mu}{\rho RT_r} \cdot \frac{1}{r} - \frac{\omega M'}{r^3}\right), \quad (5.21)$$

где  $E_\infty$  – насыщенная упругость пара над плоской поверхностью воды;

$\sigma$  и  $\rho$  – поверхностное натяжение и плотность воды;

$M'$  – масса растворенного в капле гигроскопического ядра.

Используя формулу Томсона и уравнение Клазиуса – Клапейрона:

$$\frac{dE_{\infty}}{dT_r} = \frac{L\mu E_{\infty}(T_r)}{ART_r^2} \quad (5.22)$$

для  $\Delta C_r$  получим

$$\Delta C_r = \frac{\mu E_{\infty}(T)}{RT} \cdot \left[ S - \frac{2\sigma\mu}{\rho RT} \cdot \frac{1}{r} + \frac{\omega M'}{r^3} - \left( \frac{L\mu}{ART} - 1 \right) \left( 1 + \frac{\omega M'}{r^3} \right) \frac{\Delta T_r}{T} \right] \quad (5.23)$$

где  $S$  можно представить как:

$$S = \frac{[e(T) - E_{\infty}(T)]}{E_{\infty}(T)}. \quad (5.24)$$

Ввиду того, что обычно в струе ВСМФС  $\Delta T_r \ll T_r$ , при разложении функций  $E_{\infty}(T_r)$  и  $1/T_r$  по  $\Delta T_r$  мы ограничились двумя первыми членами.

Определяя величину  $\Delta T_r$  из уравнения теплового баланса капли:

$$L \frac{dm}{dt} = 4\pi k \Delta T_r, \quad (5.25)$$

где  $k$  – коэффициент теплопроводности воздуха, для скорости конденсационного роста отдельной капли в струе ВСМФС, окончательно получим:

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r \varepsilon D \frac{\mu E_{\infty}(T)}{RT} \cdot \left( S - \frac{2\sigma\mu}{\rho RT} \cdot \frac{1}{r} + \frac{\omega M'}{r^3} \right) \cdot (1 - \beta^*), \quad (5.26)$$

где

$$\beta^* = \left[ 1 + \frac{kRT^2}{LD\varepsilon\mu E_{\infty}(T) \left( \frac{L\mu}{ART} - 1 \right) \left( 1 + \frac{\omega M'}{r^3} \right)} \right]^{-1}. \quad (5.27)$$

Выражение (5.26) совпадает с формулой, выведенной Сквайрсом в допущении  $\varepsilon = 1$ ,  $\frac{L\mu}{ART} \gg 1$  и  $\frac{\omega M'}{r^3} \ll 1$ . Если же ограничиться двумя последними упрощениями, то она может быть приведена к виду, полученному в работах [264], [265].

Величина  $\beta^*$ , описывающая замедление скорости роста капли вследствие выделения тепла конденсации на ее поверхности, оказывается зависящей от массы гигроскопического ядра  $M'$  (рисунок 5.17) [266].

Кривые изменения  $\beta^*$  с ростом капли NaCl рассчитаны для различных начальных значений  $M'$ . Из приведенных данных понятно, что присутствие множителя

$(1 - \beta^*)$  замедляет конденсационную скорость роста капли раствора примерно на 30–60 % в сравнении со случаем, когда температура капли принимается равной температуре окружающей среды. Наличие минимума в ходе зависимости  $\beta^*$  от  $r$  при наличии гироскопических солей с радиусами примерно от 2 до 5 мкм создаются наиболее благоприятные условия для конденсационного роста капель определенного размера. В частности, для NaCl эти размеры составляют приблизительно  $r = 9$  и 4 мкм соответственно. При расчетах допускалось, что величины  $L$ ,  $\alpha$ ,  $\rho$  и  $i$  не зависят от концентрации раствора. Коэффициент  $i$  брался равным 2 [266].

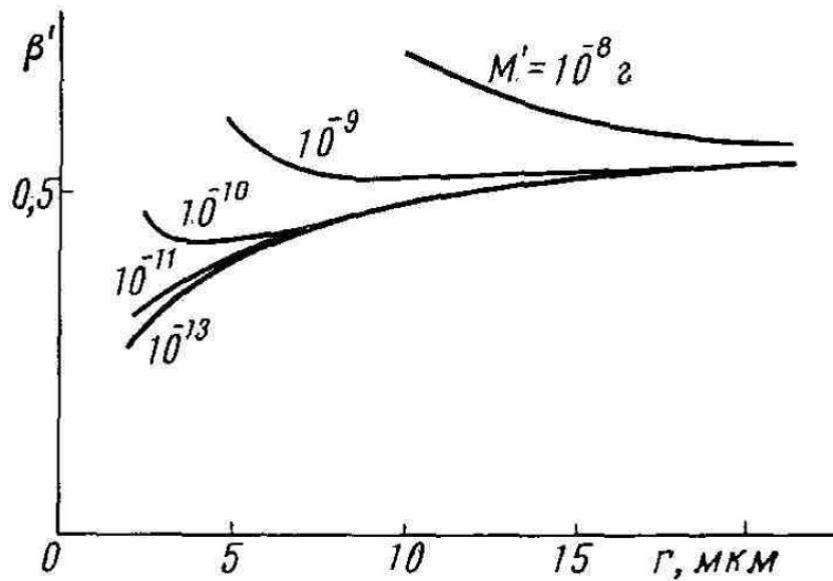


Рисунок 5.17 – Зависимость величины  $\rho'$  от радиуса капли раствора NaCl для различных значений  $M'$  при  $T = 5$  °C [266]

Кроме того, из приведенных данных следует, что интенсивность роста капель ВСМФС существенно зависит от температуры окружающей среды, а также от наличия растворенных в воде примесей.

Для получения конденсационного прироста массы совокупности капель ВСМФС, содержащихся в некотором объеме восходящего облака ВСМФС, необходимо просуммировать по всем размерам капель, находящихся в этом объеме. Пренебрегая тепловым и диффузионным взаимодействием облачных частиц ввиду их малости по сравнению с расстояниями между ними, для суммарного прироста капель в полидисперсном облаке ТАВ можно записать:

$$\frac{dW}{dt} = n \int_0^{\infty} \eta(r) \frac{dm}{dt} dr, \quad (5.28)$$

где  $W$  – масса капель в 1 г облака ВСМФС (водность воздуха);

$n$  – общее число капель в 1 г облака ВСМФС;

$\eta(r)$  – относительное число капель с радиусом  $r$ , содержащееся в 1 г облака ВСМФС.

Далее при построении математической модели распространения капель ВСМФС вдоль коллектора сделаем следующие допущения: процесс выпадения капель воды начинается только после завершения процесса нуклеации и коагуляции; объемное и массовое содержание пара в среде ВСМФС соответствует давлению и температуре насыщенных паров внутри объема.

Поэтому вместо трехфазной среды воздух-пар-капли воды будем рассматривать движение двухфазной среды воздух-капли воды.

Для этого представим расчетную схему движения ВСМФС вдоль кабельного коллектора в виде, представленном на рисунке 5.18. Участок  $L_1$  – расстояние, на котором происходит нуклеация и коагуляция среды ВСМФС до размеров капель, при которых возможно их гравитационное осаждение;  $L_2$  – расстояние максимального полета капель воды до их полного осаждения.

После вычисления времени нуклеации и коагуляции до размеров капель, склонных к седиментации за время продвижения ВСМФС на расстояние  $L_1$ , определяется время осаждения на участке  $L_2$ .

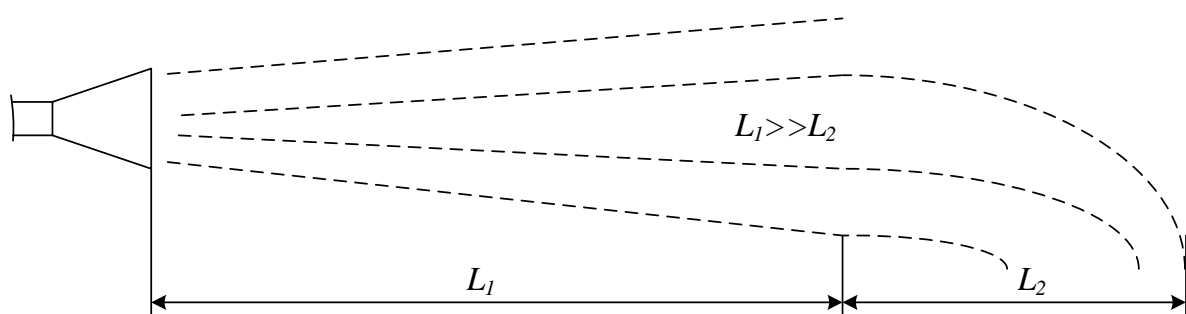


Рисунок 5.18 – Схема движения ВСМФС вдоль кабельного коллектора

Для расчета длины участка  $L_2$  рассмотрим модель течения двухфазной среды, приняв в общей постановке, что поток нестационарный и двумерный (в вертикальной плоскости), капли вдоль кабельного коллектора произвольной длины. В соответствии с общей теорией динамики двухфазных сред представим уравнение движения той или иной фазы в вертикальной плоскости в виде:



$$\begin{cases} \varepsilon\rho \frac{du}{d\tau} = -\frac{\partial \varepsilon P}{\partial x} - \varepsilon\rho g \sin \alpha - \frac{\lambda\Pi}{gS} \varepsilon\rho u|u| - \frac{3c_1}{4d_k} \varepsilon\rho_0 (u - u_0)|u - u_0|; \\ \varepsilon\rho \frac{dv}{d\tau} = -\frac{\partial \varepsilon P}{\partial y} - \varepsilon\rho g \cos \alpha - \frac{3c_2}{4d_k} \varepsilon\rho_0 v|v|, \end{cases} \quad (5.29)$$

где  $\varepsilon$  – объемная доля воздуха или капель воды;

$\rho$  – плотность водовоздушной смеси;

$\rho_0$  – плотность воздуха;

$u$  – продольная составляющая скорости водовоздушной смеси;

$v$  – вертикальная составляющая скорости водовоздушной смеси;

$P$  – давление;

$\alpha$  – угол наклона коллектора к горизонту;

$\lambda$  – коэффициент сопротивления трения;

$\Pi$  – периметр касания водовоздушной смесью поперечного сечения коллектора;

$S$  – площадь поперечного сечения коллектора;

$c_1$  и  $c_2$  – коэффициенты сопротивления относительно движению водовоздушной смеси в продольном и поперечном направлениях;

$d_k$  – диаметр капель;

$u_0$  – продольная составляющая скорости движения воздуха.

Из анализа уравнений (5.29) следует, что при объемной доле  $\varepsilon = 1$  они переходят в систему уравнений, описывающих турбулентное движение воздуха или воды. Нас интересует взаимодействие капель жидкости, а не воздуха, будем считать, что система уравнений (5.29) описывает этот процесс и может быть существенно упрощена. Так, периметр касания капель воды стенок кабельного коллектора примем равным нулю ( $\Pi = 0$ ), так как при экспериментах определено, что капли ВСМФС практически не оседают на стенах объема. Градиент давления, действующий на капли воды, также ничтожно мал, в результате уравнения (5.29) можно представить, как:

$$\begin{cases} \frac{du}{d\tau} = -g \sin \alpha - \frac{3c_1}{4d_k} (u - u_0)|u - u_0|; \\ \frac{dv}{d\tau} = -g \cos \alpha - \frac{3c_2}{4d_k} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} v|v|. \end{cases} \quad (5.30)$$

При рассмотрении сил сопротивления движению твердых или жидких частиц

принимают закон Стокса, т. е. ламинарный режим течения или турбулентный режим при больших скоростях потока. В первом случае сопротивления от числа Рейнольдса, а во втором коэффициент полагают равным константе. Однако в реальности не исключен переходный режим течения. Поэтому целесообразно объединение двух зависимостей в одну, представив в виде двучленного закона сопротивления движению. Обработка экспериментальных данных по изучению движения шаров различных диаметров в жидкости показала, что зависимость вида:

$$c = 24/\text{Re} + 0,8 \quad (5.31)$$

может быть использована с достаточной степенью точности в широком диапазоне чисел Рейнольдса ( $\text{Re} = 1 \div 10^3$ ) при относительной скорости движения  $(u - u_0) = 1 \div 30$  м/с и диаметре капель жидкости  $(50 \dots 500) \cdot 10^{-6}$  м. Эта зависимость в проекциях на оси координат примет вид:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{24\nu}{|u - u_0|d_k} + 0,8; \\ c_2 = \frac{24\nu}{|v|d_k} + 0,8 \end{cases} \quad (5.32)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха.

Подставляя формулы (5.32) в уравнение (5.30), получим

$$\begin{cases} \frac{du}{d\tau} = -g \sin \alpha - \frac{3c_1}{4d_k} (0,8|u - u_0| + 24\nu/d_k)(u - u_0); \\ \frac{dv}{d\tau} = -g \cos \alpha - \frac{3c_2}{4d_k} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} (0,8|v| + 24\nu/d_k)v. \end{cases} \quad (5.33)$$

За начальным участком продольная составляющая скорости движения капель жидкости будет равна скорости вентиляционного потока  $(u - u_0)$ . Поперечная составляющая скорости движения капель жидкости может быть определена из решения второго уравнения системы (5.33). Так в предельном случае, приравнивая правую часть нулю получим:

$$v_0 = 15\nu/d_k - \sqrt{(15\nu/d_k)^2 + 10\rho g \cos \alpha d_k/6\rho_0}. \quad (5.34)$$

Подставляя в формулу (5.34) минимальные и максимальные размеры капель,

численные значения  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ;  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\alpha = 0$  и  $d_k = 20\text{--}50 \text{ мкм}$  получим вертикальную составляющую скорости седиментации капель –  $0,01\text{--}0,03 \text{ м/с}$ . При высоте кабельного коллектора 2 м время осаждения укрупненных капель на участке  $L_2$  (рисунок 5.18) составит от 1 мин, что на два порядка меньше времени нуклеации и коагуляции капель ВСМФС.

Поэтому при интенсивности подачи ВСМФС, превышающей скорость нуклеации, коагуляции и последующей седиментации капель ВСМФС, внутри объема будет создаваться огнетушащее метастабильное облако, которое состоит из пара и капель воды. Это облако с конвективными потоками инжектируемого в очаг пожара воздуха будет поступать на поверхность горючего материала и участвовать в прекращении пламенного горения.

Возможность применения нового объемного ОТВ мобильными средствами пожаротушения, обладающими возможностью подачи избытка ОТВ, компенсирующего негерметичность помещения пожара, значительно повысит тактико-технические возможности подразделений пожарной охраны объектов энергетики.

Поэтому в настоящем исследовании поставлена задача по определению эффективности тушения пожаров в объеме при введении струй ВСМФС, а именно определение интенсивности подачи и удельного расхода ВСМФС, при которых невозможно пламенное горение. В параграфе 5.3 будут представлены результаты натуральных экспериментов по ликвидации пламенного горения в характерных помещениях объектов энергетики.

Использование технологии ВСМФС при локализации пожаров показало ее применимость и к снижению воздействия дыма при пожарах, в первую очередь, для улучшения видимости. Наибольший эффект отмечался при осаждении дымов таких составов, которые характерны при горении горючих жидкостей и электроизоляционных материалов. Исследование возможности и особенностей снижения воздействия дыма при пожарах объектов энергетики рассмотрено в параграфе 5.2.

## 5.2 Способы и средства повышения тактических возможностей пожарных за счет улучшения видимости при пожарах в зданиях объектов энергетики

Как правило, видимость в процессе развития пожара снижается из-за аэрозольных частиц (дыма) размером от 0,001 до 10 мкм, которые образуются в процессе горения из-за конденсации продуктов неполного сгорания [71], [267–269]. Размер аэрозоля (дыма) зависит от состава горючей нагрузки и условий горения (пожар, регулируемый нагрузкой или вентиляцией), чем длиннее молекулярная цепочка материала и ниже энергия внутримолекулярных связей, тем больше будет размер дымовых частиц [270]. Например, при горении целлюлозных материалов – 0,2 мкм; твердых полимеров – 0,45 мкм; мягких полимеров и жидких нефтепродуктов – 1 мкм [238].

Снижение светопрозрачности среды в дыму, а соответственно, ухудшение видимости обусловлено двумя причинами. Это рассеивание энергии света (диапазона световых волн видимого спектра для человека) и ее поглощение. В зависимости от преобладания одной причины над другой (рассеивание, поглощение) дым будет восприниматься светлее, либо темнее. В случае, если отношение длины окружности аэрозоля к длине волны видимого спектра больше одного, то преобладающей причиной ухудшения видимости будет поглощение. Поэтому при пожаре на объектах энергетики характерен дым черного цвета.

Практический опыт тушения пожаров и расчет распространения ОФП подтверждают, что дальность видимости первой достигает критических значений в сравнении с другими ОФП. Дальность видимости можно оценить, исходя из числа частиц аэрозоля в объеме, иными словами, из концентрации дыма [74]:

$$V_S = bC_s^{-1}, \quad (5.35)$$

где  $V_S$  – видимость, м;

$b$  – коэффициент пропорциональности;

$C_s$  – коэффициент ослабления света.

Исходя из выражения (5.35) видно, что с уменьшением коэффициента ослабления света пропорционально увеличивается дальность видимости. Соответственно, уменьшить коэффициент ослабления света можно снизив концентрацию аэрозоля (дыма).

В настоящее время в сфере очистки воздуха от аэрозоля можно выделить два подхода:

1) удаление загрязненного воздуха путем принудительного нагнетания «чистого» воздуха;

2) выведение из взвешенного состояния аэрозоля из газовой среды. В научной и практической деятельности пожарной охраны данные направления получили соответственно названия: дымоудаление и дымоосаждение. На практике большее развитие получил процесс дымоудаления из-за сравнительной простоты его реализации.

Пожарные подразделения для улучшения условий работы на пожаре организуют дымоудаление при помощи мобильных средств управления дымовыми и воздушными потоками [42], [271]. Однако этот метод имеет ряд ограничений, в том числе в связи со значительными объемами задымленных помещений объектов энергетики, превышающими технические возможности мобильных средств управления дымовыми и воздушными потоками. Применение стационарных систем противодымной защиты также не может в полной мере обеспечить достаточную видимость при тушении пожаров. Это связано с тем, что данные системы призваны обеспечить возможность использования путей эвакуации, причем иногда в течение лишь необходимого времени эвакуации.

Тушение пожара осложняется ОФП и их сопутствующими проявлениями. От воздействия теплового излучения, пламени, искр, высоких температур, токсичных продуктов горения, пожарных достаточно эффективно защищает экипировка и средства индивидуальной защиты органов дыхания и зрения. Поэтому данные ОФП оказывают меньшее влияние на действия при тушении пожара, в сравнении со снижением видимости в дыму.

Объекты энергетики, в том числе и АЭС, характеризуются наличием большого количества горючей нагрузки в виде изоляции токоведущих частей и горючей жидкости. Количество горючей жидкости на объектах энергетики исчисляется тоннами в виде турбинного масла и других горюче-смазочных материалов, используемых на производстве. Многочисленные натурные испытания показали, что при горении турбинного масла в течение 5 мин на площади  $5 \text{ м}^2$  в машинном зале объемом более  $8000 \text{ м}^3$  дальность видимости снижается до 1 м [5]. В типовой инструкции по тушению пожаров на электроустановках под напряжением до 10 кВ на АЭС [73] указывается, что личному составу ППО и персоналу АЭС запрещается осуществлять тушение пожара на электроустановке под напряжением в случае задымления помещений с границей видимости до не обесточенной электроустановки менее 5 м (определение границы видимости производится с использованием групповых и индивидуальных электрических фонарей, находящихся на вооружении подразделений ПО). Таким образом, для сокращения времени ликвидации пожара на АЭС необходимо предусматривать способы борьбы с дымом с целью обеспечения достаточной дальности видимости для действий личного состава ПО.

В настоящее время отсутствует значение, при котором обеспечивается достаточность видимости для действий пожарных в задымленной зоне. В области пожарной безопасности определены условия видимости на пожаре, при которой считается, что эвакуация безопасна. В трудах Ю. С. Зотова исследован вопрос обоснования значения минимальной видимости на пожаре для обеспечения безопасной эвакуации человека [238]. Видимость в 20 м, которая требуется для обеспечения безопасной эвакуации людей, в большей мере обусловлена психологическим фактором (при дальности видимости 20 м и более не возникает психологической напряженности у человека, не подготовленного к условиям пожара) [33]. Поэтому критерий видимости, обеспечивающий безопасную эвакуацию людей, не может являться обоснованием достаточности или недостаточности видимости для пожарных.

Пожары происходят в различных помещениях объектов энергетики, где динамика распространения ОФП и проявление сопутствующих ОФП различны, поэтому невозможно определить единое минимальное значение дальности видимости

для пожарных. Но в работе С. В. Остаха методом экспертных оценок, исходя из принципа обеспечения безопасной работы пожарного, приводится усредненное значение дальности видимости, равное 10 м. Также автор отмечает, что из-за индивидуальности пожара требуемая дальность видимости может меняться от нескольких метров до десятков метров.

Если рассматривать пожары исходя из объектов, где они происходят, и систематизировать их в зависимости от наиболее характерных сопутствующих проявлений ОФП, то можно более детально ответить на вопрос: «Какую дальность видимости считать для пожарных подразделений достаточной?»

Для объектов энергетики наиболее вероятным сопутствующим проявлением ОФП будет являться высокое напряжение. В данном случае дальность видимости не должна быть меньше расстояния, на котором действует источник опасности для жизни и здоровья пожарного. В общем виде можно дать следующее понятие достаточной видимости для пожарного: дальность видимости, превышающая расстояние действия источника опасности в условиях пожара.

Для объектов энергетики целесообразно оценивать расстояние достаточной видимости по наиболее вероятному сопутствующему проявлению ОФП (вынос высокого напряжения). Вероятность поражения пожарного электрическим током обуславливается его действиями.

При пожаре следует выделить две основные задачи: разведка, в том числе спасение людей, и тушение. Так, при проведении разведки в задымленной зоне, минимальная достаточная видимость будет определяться расстоянием действия шагового напряжения, либо опасности касания токоведущих частей.

При подаче ОТВ достаточная видимость будет равняться длине струи, тем самым уменьшится вероятность случайного попадания ОТВ на токоведущие части. Таким образом, минимальная допустимая дальность видимости в дыму определяется исходя из задач, которые выполняют пожарные в задымленной зоне.

В процессе ликвидации пожаров на объектах энергетики необходимо обесточить электроустановки для предотвращения поражения (травмирования) электро-

током личного состава. Учитывая важность постоянного функционирования объектов энергетики для жизнеобеспечения населенных пунктов, в некоторых случаях нарушение технологического процесса повлечет за собой более значимый ущерб, чем даже сам пожар. А на объектах атомной энергетики имеется целый ряд помещений, отвечающих за безопасность ядерного реактора, выход из строя которых может привести к катастрофе. Таким образом, на практике тушение пожаров электроустановок под напряжением исключать полностью нельзя. Поэтому РТП важно принять меры для обеспечения дальности видимости или применять методы тушения пожара, исключающие или уменьшающие риск поражения электрическим током пожарных. От выбора ОТВ и способа его подачи зависит безопасное расстояние, при котором пожарные не попадут под воздействие тока утечки. Но в задымленной зоне не всегда возможно определить требуемое расстояние для обеспечения безопасности пожарного. Поэтому при плотности задымления в помещении, когда дальность видимости менее необходимого расстояния, установленного нормативными документами или расстоянием, необходимым для безопасной работы ствольщика, такую дальность видимости следует считать недостаточной. В связи с этим понятия достаточной или недостаточной видимости могут стать основанием для принятия решения по выбору алгоритма действий для РТП, направленного на локализацию и ликвидацию пожара. В случае, когда расстояние действия источника опасности превышает дальность видимости в дыму, РТП с целью уменьшения риска травмирования и гибели пожарных следует принять решение о необходимости проведения дымоудаления и других мер, направленных на увеличение дальности видимости в дыму. При невозможности улучшения видимости РТП следует принимать всевозможные превентивные меры по недопущению травмирования и гибели личного состава.



### 5.2.1 Применение методов и средств дымоудаления

Для создания приемлемых условий, необходимых для спасения пострадавших и работы пожарных, подразделения пожарной охраны организуют удаление дыма за счет разбавления задымленного воздуха «чистым». Этот процесс замены реализуется при помощи создания разности давления между помещением пожара и окружающей средой, используя при этом, как правило, пожарные дымососы и вентиляторы, или (при наличии на объекте) противодымную вентиляцию. Поэтому в практике тушения пожара процесс дымоудаления можно классифицировать по признакам стационарности и мобильности. Все системы дымоудаления работают на одном принципе – создание разности давления между задымленным объемом, который необходимо очистить, и окружающей средой. Системы дымоудаления отличаются только техническими средствами, создающими разницу давлений, и организацией ее осуществления. Организация дымоудаления зависит от цели ее проведения (обеспечение работы по тушению пожара, эвакуация людей). Так, например, для эвакуации людей из высотных зданий лестничные клетки (вертикальные пути эвакуации) защищают приточно-вытяжной вентиляцией. На первый взгляд, защита от дыма вертикальных путей эвакуации не вызывает сложности. Создание необходимой разницы давления обеспечит незадымляемость лестничных клеток, но в современных высотных зданиях при проектировании и эксплуатации данных систем обнаружен их серьезный недостаток. Для гарантированного незадымления лестничных клеток необходимо создавать избыточное давление воздушного объекта [272], которое затрудняет открытие дверей, ведущих на вертикальные пути эвакуации [273].

Объекты энергетики, с точки зрения защиты от продуктов горения, имеют ярко выраженную специфику, а именно, здания развиты по горизонтали, имеются помещения с большими объемами (конструктивные особенности), наличие горючих веществ, горение которых приводит к образованию большого количества черного, непроницаемого дыма и др. Исходя из этих особенностей, разрабатываемые системы противодымной защиты должны учитывать особенности объектов энерге-

тики, а также важность сохранения работоспособности не только в процессе эксплуатации, но и при тушении пожара.

Противодымная защита на объектах энергетики предусматривается в лестничных клетках, кабельных сооружениях, шахтах лифтов (коммуникационные помещения) машинных залов и щитах управления. Проектирование и расчеты систем противодымной защиты производятся на объектах энергетики по утвержденным методикам [274].

В настоящее время проектируемые системы дымоудаления, в первую очередь, решают задачи по обеспечению эвакуации людей при пожаре. Данная задача выполняется посредством создания избыточного давления на путях эвакуации (лестничные клетки, коридоры), кабельных сооружениях. Избыточное давление создается за счет нагнетания воздуха системами противодымной вентиляции. Помещения машинных залов защищают от продуктов горения путем устройства светоаэрационных фонарей, дымовых клапанов [275], [276]. Защита от дыма помещений щитов управления организуется исходя из двух возможных вариантов пожара. По первому варианту защиты нагнетается «чистый» воздух в помещение щита управления (создание избыточного давления), тем самым исключается попадание дыма в помещения, сопряженные с ним. Второй вариант защиты реализуется с помощью удаления дыма из верхней зоны (поддерживается плоскость равных делений выше рабочей зоны).

Анализ карточек учета пожаров в Российской Федерации, произошедших на объектах энергетики с 2009 по 2018 гг., показал, что работа имеющихся систем дымоудаления на данных объектах не отмечена. Соответственно, можно утверждать, что системы дымоудаления при возникновении пожара не сработали или вовсе отсутствовали в помещении, где развивался пожар. Особенности замкнутых объемов объектов энергетики, где развивается пожар, приводят к образованию задымленных зон уже в первые минуты, что заметно затрудняет процесс тушения пожара.

Для пожарных при тушении пожара на объектах энергетики обеспечение достаточной дальности видимости является вопросом собственной безопасности. В настоящее время существуют технические средства, способные обеспечить приемлемые условия их работы. Организация дымоудаления осуществляется при помощи

пожарных дымососов и нагнетательных вентиляторов. При понимании конструктива здания и его инженерных систем возможно на месте пожара организовать аналог стационарной системы дымоудаления – мобильную систему дымоудаления. Главное преимущество последней – это возможность установки вентиляторов (дымососов) исходя из оперативной обстановки в процессе развития пожара. В практике пожаротушения данный подход получил название тактической вентиляции (ТВ).

Тактическая вентиляция – комплекс мероприятий по управлению газообменом на пожаре с использованием специальных технических средств и принципов для снижения вероятности воздействия ОФП, гибели и травмирования людей, и создания приемлемых условий для ликвидации горения или последствий чрезвычайной ситуации [8].

Применение ТВ направлено на решение следующих задач:

- уменьшение вероятности обратной тяги при открывании проемов пожарными и предотвращение появления объемной вспышки;
- удаление перегретого газа и пара;
- увеличение дальности видимости в дыму;
- ограничение распространения дыма.

Основной принцип ТВ, как и любой другой системы дымоудаления, основан на создании разности давления между помещением пожара и окружающей среды. При этом перемещение дымовых масс осуществляется мобильными техническими средствами (вентиляторы, пожарные дымососы), а в роли каналов дымоудаления выступают ограждающие конструкции самого здания.

Одним из основных факторов принятия решения для организации ТВ является определение стадии пожара и учета имеющихся (сосредоточенных на месте пожара) сил и средств. Рекомендуется применять ТВ в стадии пожара, регулируемой нагрузкой и при условии возможности одновременных действий по тушению пожара [8]. Также важно обеспечить необходимые размеры приточных и вытяжных проемов. В свою очередь, рекомендуется вытяжной проем создавать в непосредственной близости к зоне горения, при этом его соотношение с приточным должно

быть 2:1. Пространство между приточным и вытяжным проемами образует вентиляционный канал (движение нагнетаемого воздуха). Исходя из особенностей организации ТВ видны ограничения и риски по ее применению. Один из главных недостатков, как показала практика применения ТВ, это невозможность точно спрогнозировать движение продуктов горения при условии отсутствия в непосредственной близости от зоны горения вытяжного проема.

Примером применения ТВ на объекте энергетики, показывающий, с одной стороны, его эффективность, с другой – опасность, может служить пожар на кабельном коллекторе «Горьковский» в г. Москве [8]. Пожар произошел в результате воспламенения изоляции кабелей. Пожарные не смогли подать ОТВ непосредственно в зону горения из-за сильного задымления и высокого теплового потока. Протяженность зоны задымления в коллекторе превышала 1 км. РТП решил для проведения разведки и дальнейшего тушения применить ТВ, которая была организована следующим образом. У входа в коллектор установили три нагнетательных вентилятора. Между всеми участками тушения пожара была установлена устойчивая радиосвязь. Организованы вытяжные проемы (вскрыты люки) и подготовлены резервные силы и средства. После начала ТВ передавали информацию об интенсивном выходе дыма из вытяжных проемов. После снижения уровня задымления пожарные смогли подойти к непосредственной зоне горения и ликвидировать его. Однако в процессе разбора пожара выяснилось, что кабельный коллектор был соединен коммуникациями со зданиями с массовым пребыванием людей и лишь благодаря уцелевшей металлической перегородке, продукты горения не проникли к ним [8].

Рассмотренный пример показывает одновременно положительные и отрицательные стороны ТВ. К положительным относятся сравнительная простота реализации и достигаемый эффект, к отрицательным – проблема нахождения места удаления продуктов горения и возможный ущерб от них. В связи с этим использование ТВ не может полностью решить вопрос обеспечения безопасности работ пожарных при образовании зон задымления.

Все способы борьбы с дымом, основанные на дымоудалении, имеют 4 основных недостатка, которые и ограничивают их применение в сфере тушения пожаров:

1) разбавление задымленного воздуха «чистым» с нормальным содержанием кислорода может повлечь более интенсивное горение, особенно, при режиме пожара, контролируемого вентиляцией;

2) сложность организации удаления дыма из помещений, ограждающие конструкции которого не выходят непосредственно наружу, как правило, данные помещения образуют застойные («мертвые») зоны;

3) дым распространяется по всему каналу дымоудаления;

4) удаленные продукты горения могут нанести значительный материальный и экологический вред.

Исходя из вышесказанного следует, что организация дымоудаления при пожаре в полной мере не может решить проблему с продуктами горения. В связи с этим в области обеспечения тушения пожаров имеются проработки способов очистки воздуха от продуктов горения, основанные на создании условий выведения из взвешенного состояния дымовых частиц. Совокупность способов, основанных на принципе выведения из взвешенного состояния аэрозоля, получило название дымоосаждение.

### **5.2.2 Разработка способов, устройств и приемов дымоосаждения**

Способы, реализующие дымоосаждение, преимущественно реализованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах с проведением экспериментов, показывающих эффективность и перспективность данного направления [277–279]. Анализ работ в области дымоосаждения позволяет предложить следующую классификацию:

– выведение из взвешенного состояния дымовых частиц водным (водными растворами) аэрозодем;

– способы осаждения дыма (очистка воздуха от продуктов горения) при помощи аппаратов мокрой очистки;

– очистка воздуха под действием звукового воздействия.

Выведение из взвешенного состояния дымовых частиц водным аэрозодем

(водными растворами) рассмотрено в работах [277–279]. Авторы пришли к мнению, что для дымоосаждения в задымленный объем наиболее эффективно вводить водный аэрозоль с дисперсностью не более 400 мкм. При вводе в задымленный объем водного аэрозоля с необходимыми характеристиками наблюдается захват каплей воды дымовых частиц и последующее осаждение за счет сил тяжести. Коэффициент захвата каплей воды дымовых частиц зависит, главным образом, от сил поверхностного натяжения и размеров капель воды. В исследовании [278] говорится, что максимальное значение коэффициента захвата каплей воды дымовых частиц достигается при размере капли 40 мкм. В работе дается объяснение, как из-за более длительной экспозиции капли воды соединяются с дымовым аэрозолем.

В нормативном документе [280] впервые даны прямые указания по возможному применению в практике пожаротушения способа осаждения дыма, основанного на выведении из взвешенного состояния дымовых частиц водным аэрозолем. Возможность применения этого способа осаждения дыма в практике пожаротушения возникла благодаря появлению мобильной ранцевой установки, способной подавать распыленную воду с необходимой дисперсностью. Но учитывая продолжительность работы ранцевой установки (не более 30 с: запас воды – 10 л, расход 0,4 л/с), сфера ее применения ограничена только начальной стадией пожара.

Авторы исследования [281] предложили проводить очистку воздуха от продуктов горения на основе двух подходов к дымоудалению и осаждению дыма. Предложение заключается в следующем. Нагнетательными вентиляторами создается избыточное давление и в создаваемый поток вводится распыленная вода. По своей сути предложенный способ следует отнести к дымоудалению, так как основной результат очистки воздуха достигается разбавлением загрязненного воздуха чистым, а вклад в очистку воздуха за счет осаждения частиц дыма на каплях воды остается минимальным. Однако следует отметить, что ввод распыленной воды может уменьшить (хотя и не предотвратить в полной мере) риск более интенсивного распространения пожара.

В работе [279] предложен метод дымоосаждения, который экспериментально реализован в замкнутом объеме (1 м<sup>3</sup>). Эксперимент проводили в два этапа. На пер-

вом этапе распыляли водный аэрозоль массой 500 г в течение 90 с (распыл из пневмофорсунки). На втором этапе распыляли 30 г сорбента (порошок силохром). Экспериментальные данные показали высокую эффективность очистки воздуха от дыма (не менее 90 % дымовых частиц осели), но из-за сложности реализации данного способа в условиях реального пожара в настоящий момент на практике пожаротушения он не применяется.

Широкое распространение в сфере очистки воздуха от различных аэрозолей получили аппараты мокрой очистки. Пожаротушение не является исключением. Например, в работе В. П. Степанова [282] представлена система очистки воздуха от продуктов горения на основе аппарата мокрой очистки (труба Вентури). Как и в предыдущих исследованиях проверялась эффективность системы на экспериментальном стенде с замкнутым объемом в  $1 \text{ м}^3$ , в котором сжигались разные материалы до полной потери видимости. После установления устойчивого задымления весь объем задымленного воздуха прогонялся через трубу Вентури, а очищенный воздух возвращался в экспериментальную камеру. Изучалось, как меняется эффективность очистки воздуха в зависимости от качества водного распыла (в том числе изменение свойств воды), подаваемого в трубу Вентури. Результаты эксперимента показали эффективность очистки воздуха, однако информации о дальнейших исследованиях на полномасштабном объекте, к сожалению, не имеется. Также следует отметить, что В. П. Степанов предложил концепцию стационарной системы дымоосаждения с элементами системы дымоудаления. С экономической и технической точки зрения не все помещения целесообразно оборудовать данными системами очистки воздуха от продуктов горения, что ограничивает их применение в сфере тушения пожаров.

Следующая большая группа способов осаждения аэрозолей основана на воздействии звуковых волн на аэрозольные системы. Физический смысл способов осаждения дыма, основанных на акустическом воздействии, заключается в следующем. Так как продолжительность жизни аэрозольной системы напрямую зависит от скорости роста аэрозольных частиц до размеров (массы), при которых они под действием гравитации сравнительно быстро осаждаются, а скорость роста частиц аэрозоля зависит от коагуляции (слипание частиц аэрозоля при столкновении друг с другом), то «озвучивание» задымленного объема приводит к тому, что звуковые волны

заставляют дымовые частицы более интенсивно колебаться, тем самым увеличивается вероятность их столкновений между собой, что, как правило, приводит к слипанию, увеличению в размере и дальнейшему осаждению [267]. В данной области известны работы С. В. Остаха [283], где приводятся данные, что при правильном выборе силы и частоты звука можно добиться осаждения аэрозольных частиц в озвученном объеме не менее 96 % в течение 30 с. Но также закономерно отмечается сложность применения способов очистки воздуха акустическим излучением вне лабораторных условий: изменение объема (особенно изменение геометрии) значительно снижает эффективность метода, а необходимый уровень силы звука составляет 20-200 Н/м<sup>2</sup> [252]. Известно, что данный уровень звука является болевым порогом для человека, что делает применение способов осаждения дыма, основанных на акустическом излучении, в процессе тушения пожара опасным для пожарных.

Принцип осаждения дыма в условиях тушения пожара на объектах энергетики, несмотря на сложность его применения, можно реализовать при помощи технологии получения водной среды в метастабильном фазовом состоянии (ВСМФС). Данная технология позволяет получить капли воды, сопоставимые с размерами частиц дыма.

Из проведенных исследований известно, что капли ВСМФС, образовавшиеся при взрывном вскипании, принимают бимодальное распределение по размерам капель. Первая группа капель принимает размеры 0,1–0,3 мкм, а вторая группа капель 6–8 мкм [110]. Далее предлагается техническое решение, работа которого основывается на использовании технологии получения ВСМФС.

Оценить применимость устройства осаждения аэрозолей (УОА) с помощью ВСМФС с целью очищения воздуха от продуктов горения в процессе тушения пожара можно по двум основным критериям: мобильность и эффективность осаждения дыма. Соответствие требованию мобильности – это возможность переноски устройства силами одного звена ГДЗС. Эффективность осаждения дыма, при условии, что пожарные работают в дыхательных аппаратах, целесообразно оценивать по изменению видимости в задымленном помещении до очистки воздуха и после. На рисунке 5.19 изображена принципиальная схема работы УОА по использованию технологии ВСМФС для осаждения дыма.



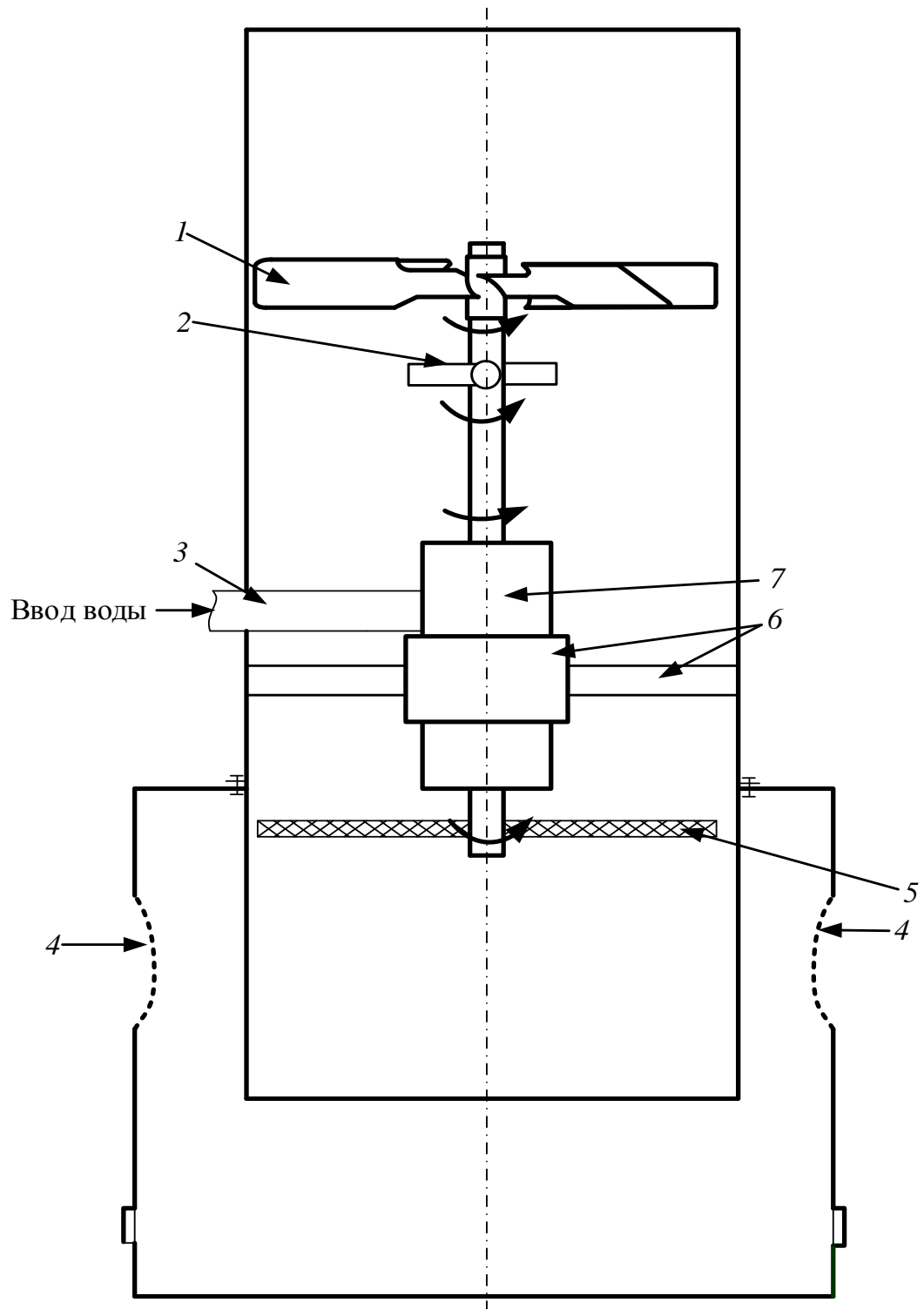


Рисунок 5.19 – Принципиальная схема работы УОА

по использованию технологии ВСМФС для осаждения дыма:

1 – крыльчатка; 2 – гидроторбина (сегнерово колесо); 3 – рукав для подачи воды; 4 – выходные отверстия (выход очищенного воздуха);

5 – фильтр (сетка, закрепленная на валу); 6 – крепеж изолирующего узла;

7 – изолирующий узел

Принцип работы предлагаемого УОА ВСМФС заключается в следующем. Недогретая вода (170–300 °С, 2–20 МПа) по рукаву 3 подается через полость вала к лопастям турбины (сегнерова колеса) 2, где находятся на концах полых трубок насадки-распылители. При выходе из насадков распылителей происходит взрывное вскипание воды. Реактивная реакция струи вращает вал с лопастями вентилятора 1 и сетками 5. За счет вращения лопастей вентилятора аэрозоль всасывается в данное устройство, где происходит взаимодействие аэрозоля с парокапельной смесью. Затем смесь аэрозоля и ВСМФС осаждается на сетках. Продукты осаждения отбрасываются на периферию сетки, за счет чего происходит самоочищение сетки и продукты осаждения стекают в поддон. Очищенный воздух выходит через прорези в основании устройства.

Для более детальной проработки технического решения по использованию технологии ВСМФС необходимо провести исследования для выявления закономерностей взаимодействия дыма с каплями ВСМФС. Предполагается, что за счет бимодального распределения по размерам капли ВСМФС смогут стать не только центрами коагуляции, но и коагулироваться на частицах дыма. Способствовать процессу конденсации будет значительное содержание пара (до 30 % от массы недогретой воды до взрывного вскипания). Суммарный эффект от коагуляции и конденсации в аппарате позволит получить достаточно крупный аэрозоль для инерционного улавливания на сетках 5 и ударно-инерционного улавливания о зеркало жидкости в поддоне. Предлагаемый способ осаждения дыма с помощью технологии ВСМФС поможет пожарным улучшить видимость в задымленном помещении.

За счет мобильности устройства, в зависимости от складывающейся обстановки в процессе тушения пожара, его можно в приемлемый срок установить в необходимое место. Устройство не нагнетает дополнительный воздух в помещение, тем самым его работа не будет способствовать развитию пожара, а напротив, за счет ВСМФС произойдет снижение температуры и интенсивности горения. Осаждение дыма позволит улучшить видимость, что поможет адекватно оценивать опасность при тушении пожара на объектах энергетики. Обеспечение видимости,

которая позволит пожарным заметить опасность раньше, чем они попадут под ее воздействие, приведет к уменьшению риска получения травм и быстрой локализации и ликвидации пожара.

Для подтверждения эффективности применения предложенного способа и устройства осаждения дыма с помощью технологии ВСМФС был проведен ряд натурных экспериментов.

Исследования для подтверждения эффективной работы устройства осаждения дыма проводились при помощи замера изменения уровня фототока, вырабатываемого фотодиодом, и сравнения регистрируемых значений фототока при работе устройства осаждения дыма при различных параметрах воды.

Для получения сравнительных данных по изменению эффективности осаждения дыма в зависимости от режима работы экспериментальной установки исследование разделили на несколько частей.

В первой части эксперимента ставится цель регистрации значений фототока при подаче воды ниже  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т. е. работа устройства будет осуществляться без паровой фазы. Необходимо проверить, как при прочих равных условиях дымовой аэрозоль будет улавливаться крупными каплями воды без создания условий нуклеации.

Эксперимент был проведен для получения данных по выведению из взвешенного состояния частиц дыма при включении следующих механизмов осаждения: захват частиц дыма крупной каплей воды, ударно-инерционное осаждение (соударение потока о зеркало жидкости). Для этого к экспериментальной установке подводили недогретую воду с параметрами  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P = 2\text{ МПа}$ . При горении ручной дымовой гранаты РДГ-2Ч температура продуктов горения составляла более  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 5.20).



Рисунок 5.20 – Работа экспериментального устройства осаждения дыма  
( $P = 2$  МПа,  $T = 20$  °С)

Фототок, регистрируемый с фотодиода во время горения РДГ-2Ч и работы установки, показан на рисунке 5.21.

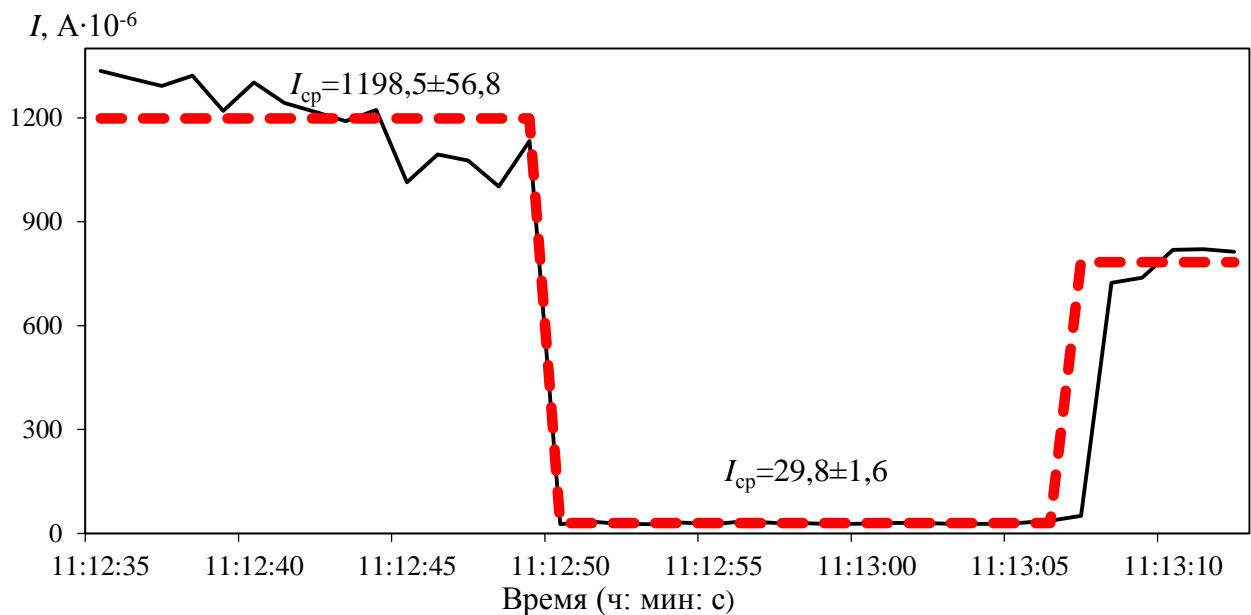


Рисунок 5.21 – График изменения оптической плотности при осаждении аэрозоля от РДГ-2Ч ( $P = 2$  МПа,  $T = 20$  °С):

- показания фотодиода ФК-7;
- - - среднее значение фототока

Визуально было зафиксировано, что при реализации механизмов осаждения захват частиц дыма крупной каплей воды и ударно-инерционное осаждение не принесли заметного результата (рисунок 5.22).



Рисунок 5.22 – Осаждение дымовых частиц ( $P = 2$  МПа,  $T = 20$  °С)

Дальнейшее исследование эффективности работы устройства осаждения дыма проводили при  $P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С.

Результат изменения фототока, регистрируемый с фотодиода, приведен на графике (рисунок 5.23).

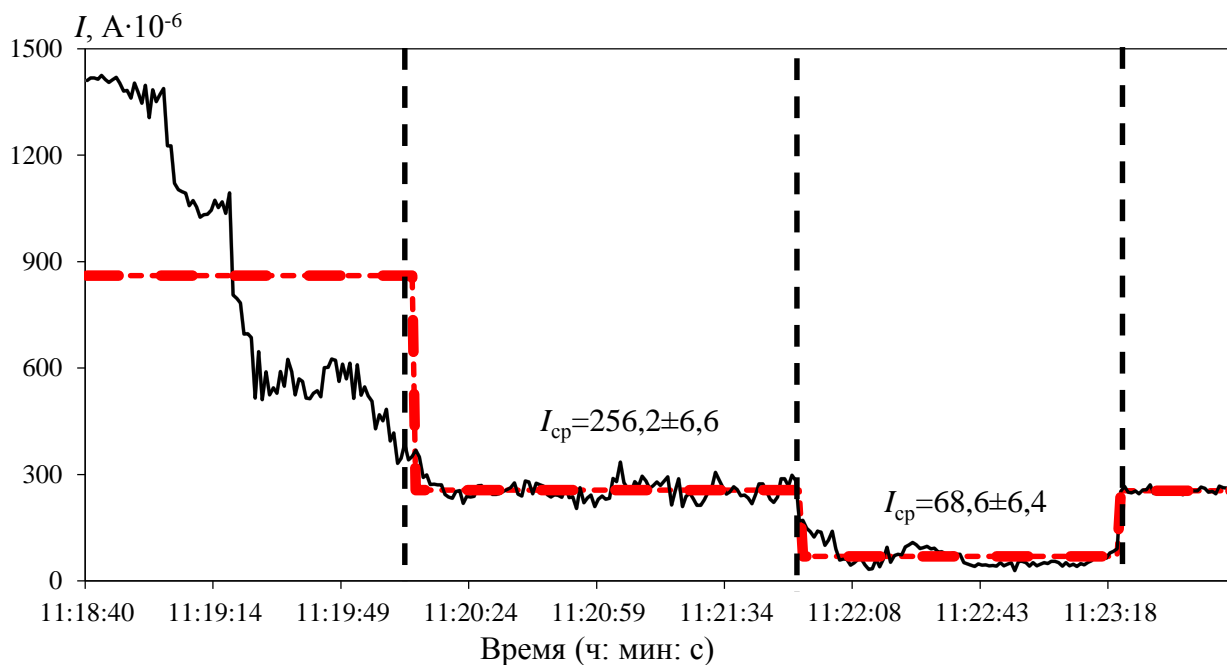


Рисунок 5.23 – График изменения фототока в процессе работы установки ( $P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С) и осаждения продуктов горения от дымовой шашки (РДГ-2Ч):

- показания фотодиода ФК-7;
- - - среднее значение фототока

На первом участке графика (рисунок 5.23) показано, что изменение фототока происходит при выходе устройства осаждения дыма на рабочий режим (регистрируется изменение светопропускаемости среды из-за выхода паракапельной среды из нижней обечайки устройства). При подаче воды ( $P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С) наблюдается устойчивое ослабление прозрачности среды до определенного уровня и дальше ослабления света не происходит.

На втором участке графика (рисунок 5.23) указанные значения фототока соответствуют световой пропускаемости паракапельной среды, выходящей из устройства без частицы дыма (рисунок 5.24).



Рисунок 5.24 – Выход на рабочий режим экспериментальной установки:

$a - P = 2$  МПа,  $T = 20-60$  °С;  $b - P = 2$  МПа,  $T = 60-160$  °С;

$в - P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С

На третьем участке графика (рисунок 5.23) показано изменение оптической плотности газовой среды, выходящей из установки осаждения дыма при осаждении продуктов горения от РДГ-2Ч (рисунок 5.25).

Визуально было зафиксировано, что при работе установки ( $P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С) происходило осаждение продуктов горения от РДГ-2Ч. При более интенсивном горении дымовой гранаты выходила темно-серая смесь (паракапельная среда с продуктами горения).





Рисунок 5.25 – Осаждение дымовых частиц ( $P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С)

В результате экспериментального исследования определили производительность устройства осаждения дыма, которая составила  $3700 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Экспериментальная производительность оказалась меньше ожидаемой расчетной на 25 %. Это произошло по двум основным причинам: первая – использовали упрощенный расчет исходя из закона сохранения энергии для расчета частоты вращения крыльчатки, вторая – не учитывали низкий КПД узла уплотнения.

Эксперимент по исследованию осаждения дыма экспериментальным устройством состоял из двух этапов.

*Первый этап эксперимента.* Сначала было зафиксировано изменение уровня светопропускаемости среды при попытке очистить воздух от дымового аэрозоля без предварительного укрупнения (подача воды к соплам экспериментального устройства при  $P = 2$  МПа,  $T = 14\text{--}20$  °С). Зарегистрированный фоновый фототок до горения РДГ-2Ч составил  $1198,5 \pm 56,8$  ( $\text{А} \cdot 10^{-6}$ ), в процессе горения фототок снизился до  $29,8 \pm 1,6$  ( $\text{А} \cdot 10^{-6}$ ) (рисунок 5.21), таким образом можно определить процент прошедшего светового потока через метровый слой дыма:

$$X_1 = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100 \% = \frac{29,8 \pm 1,6}{1198,5 \pm 56,8} \cdot 100 \% = 2,4 \dots 2,6 \% , \quad (5.36)$$

где  $X_1$  – процент светового потока, прошедшего через метровый слой дыма, при

горении РДГ-2Ч и осаждении продуктов горения устройством осаждения дыма с параметрами воды  $P = 2$  МПа,  $T = 14-20$  °С;  $I_1$  – показания фотодиода фонового света, ( $A \cdot 10^{-6}$ );  $I_2$  – показания фотодиода при прохождении продуктов горения, ( $A \cdot 10^{-6}$ ).

*Второй этап эксперимента.* Было зафиксировано изменение уровня светопропускаемости среды при работе устройства осаждения дыма с параметрами воды  $P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С. Фоновый фототок до горения РДГ-2Ч был взят  $1198,5$  ( $A \cdot 10^{-6}$ ), в осаждении дыма вырабатываемый фототок снизился до уровня  $68,6$  ( $A \cdot 10^{-6}$ ) (рисунок 5.23), тогда процент прошедшего светового потока через метровый слой парокапельной среды с не осевшими продуктами горения составит:

$$X_2 = \frac{I_3}{I_1} \cdot 100 \% = \frac{68,6 \pm 6,4}{1198,5 \pm 56,8} \cdot 100 \% = 5,2 \dots 6,3 \% , \quad (5.37)$$

где  $X_2$  – процент светового потока, прошедшего через метровый слой дыма и парокапельной смеси, при горении РДГ-2Ч и осаждении продуктов горения на установке осаждения дыма с параметрами воды  $P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С;  $I_1$  – показания фотодиода фонового света, ( $A \cdot 10^{-6}$ );  $I_3$  – показания фотодиода при прохождении парокапельной смеси с не осевшими продуктами горения, ( $A \cdot 10^{-6}$ ).

Необходимо отметить, что при работе устройства осаждения дыма с параметрами воды  $P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С фоновое значение фототока уменьшается из-за выхода парокапельной среды и составляет  $256,2$  ( $A \cdot 10^{-6}$ ) (рисунок 5.23):

$$X_{2,1} = \frac{I_4}{I_1} \cdot 100 \% = \frac{256,2 \pm 6,6}{1198,5 \pm 56,8} \cdot 100 \% = 20,0 \dots 23,0 \% , \quad (5.38)$$

где  $X_{2,1}$  – процент светового потока, прошедшего через метровый слой парокапельной смеси, при работе устройства осаждения дыма с параметрами подводимой воды к соплам  $P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С;  $I_4$  – показания фотодиода при прохождении парокапельной смеси.

Соответственно, ослабление пропускной среды из-за не осевших продуктов горения составит:

$$X_{2,2} = \frac{I_3}{I_4} \cdot 100 \% = \frac{68,6 \pm 6,4}{256,2 \pm 6,6} \cdot 100 \% = 23,7 \dots 30,0 \% , \quad (5.39)$$



где  $X_{2,2}$  – процент светового потока, прошедшего через метровый слой дыма, при осаждении продуктов горения устройством осаждения дыма с параметрами воды  $P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С без учета ослабления светового потока от парокапельной смеси.

Ослабление светового потока на основе показаний фотодиода при горении РДГ-2Ч и осаждении продуктов горения экспериментального устройства с различными параметрами представлены в таблице 5.2. Следует учесть, что во втором случае ослабление света происходит в два этапа: первый этап – ослабление при прохождении света через парокапельную среду (ослабление в 4,7 раза от фонового светового потока); второй этап – ослабление света при прохождении через парокапельную среду и продукты горения (ослабление в 3,7 раза по отношению к силе света, проходившей через парокапельную смесь).

Таблица 5.2 – Изменение оптической плотности при работе экспериментальной установки

Параметры воды ( $T$ , °С; $P$ , МПа)	Среднее значение фототока при осаждении продуктов горения ( $A \cdot 10^{-6}$ )	Прошедший световой поток, %
$17 \pm 3$ ; $2 \pm 0,1$	$29,8 \pm 1,6$	2,4–2,6
$180 \pm 5$ ; $2 \pm 0,1$	$68,6 \pm 6,4$	5,2–6,3

В случае работы установки с параметрами воды  $P = 2$  МПа;  $T = 20$  °С световой поток, прошедший через 1 метр продуктов горения, ослабился в 40 раз, а при работе с параметрами воды  $P = 2$  МПа,  $T = 180$  °С световой поток ослабился в 17,5 раза, что соответствует более эффективной очистке воздуха.

В результате проведенных экспериментальных исследований было доказано, что наличие паровой фазы повышает эффективность осаждения мелкодисперсного аэрозоля, а повышение температуры воды приводит к снижению производительности экспериментальной установки.

Сопоставляя производительность устройства осаждения дыма ( $3700$  м<sup>3</sup>/ч) и зафиксированную степень очистки газовой среды от дымовых частиц, становится ясно, что возможно улучшить видимость в ограниченном объеме (локально) в месте работы технического средства в течение 1 мин работы в радиусе 3 м

от устройства. Скорость очистки газовой среды является сопоставимой со скоростью передвижения звена ГДЗС в условиях задымления при нулевой видимости. Таким образом, использование данного технического средства позволяет повысить защиту звеньев ГДЗС при увеличении светопропускной способности в задымленном объеме, не снижая при этом скорости передвижения в задымленной зоне.

Следующим направлением использования воды в метастабильном фазовом состоянии для осаждения дыма является разработка способа поэтапного осаждения дыма:

- 1) смачивание частиц дыма водой в ВСМФС «теплый туман» (слипание дымовых частиц – укрупнение);

- 2) охлаждение среды струями холодной воды, что приводит к быстрому осаждению укрупненных капель, улучшению видимости и снижению токсичности.

Технология способа поэтапного осаждения дыма представляет собой заполнение помещения ВСМФС (до  $10 \text{ м}^3/\text{с}$ ), взятие паузы на связывание (до 1 мин.), и подачу струи распыленной воды на пути продвижения звена. Проведенный эксперимент показал возможность применения такого способа в практической деятельности. Так, в частности, четырехколенный лабиринт длиной 20 м (в помещении объемом  $70 \text{ м}^3$ ) был преодолен звеном всего за 100 с.

Для апробации предложенных способов осаждения дыма в условиях, приближенных к реальным действиям звена ГДЗС на пожаре, было решено провести натурные эксперименты.

Первый эксперимент произведен в замкнутом объеме – помещении дымокамеры с геометрическими размерами  $3,5 \times 7,5 \times 3,8 \text{ м}$ . Ставилась задача по оценке скорости очистки помещения объемом в  $100 \text{ м}^3$  от дыма посредством его осаждения двумя предложенными способами. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 5.26

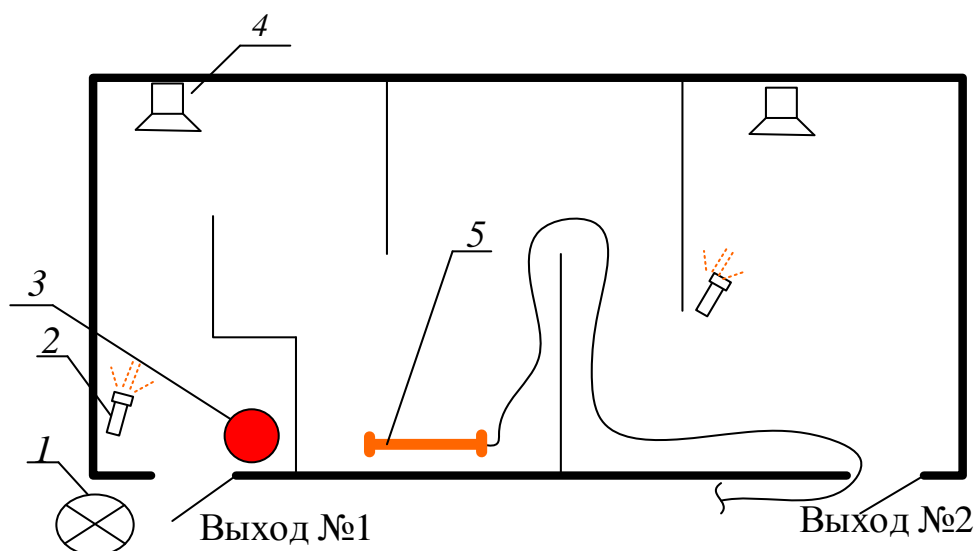


Рисунок 5.26 – Схема размещения приборного оборудования при проведении эксперимента в дымокамере:

1 – нагнетательный вентилятор; 2 – фонарь; 3 – место размещения генератора аэрозоля; 4 – экшн-камера; 5 – оптический измерительный комплекс

Эксперимент производился в следующей последовательности:

1) поджиг ручной дымовой гранаты марки РДГ-2Ч в качестве генератора аэрозоля (поз. 3 на рисунке 5.26, рисунок 5.27);



Рисунок 5.27 – Фрагменты поджига и последующего горения РДГ-2Ч

2) ожидание прогорания РДГ-2Ч и заполнения продуктами горения всего объема. В течение 2 мин после поджига наблюдалась полная потеря видимости (см. рисунки 5.28–5.30), что соответствовало показаниям оптического измерительного комплекса менее 300 мА.

Внутри дымокамеры было установлено две видеокамеры, напротив которых на расстоянии 2 м располагались фонари. На рисунке 5.28 указано, как изменялась видимость света фонаря (соответствует I участку графика рисунка 5.29);

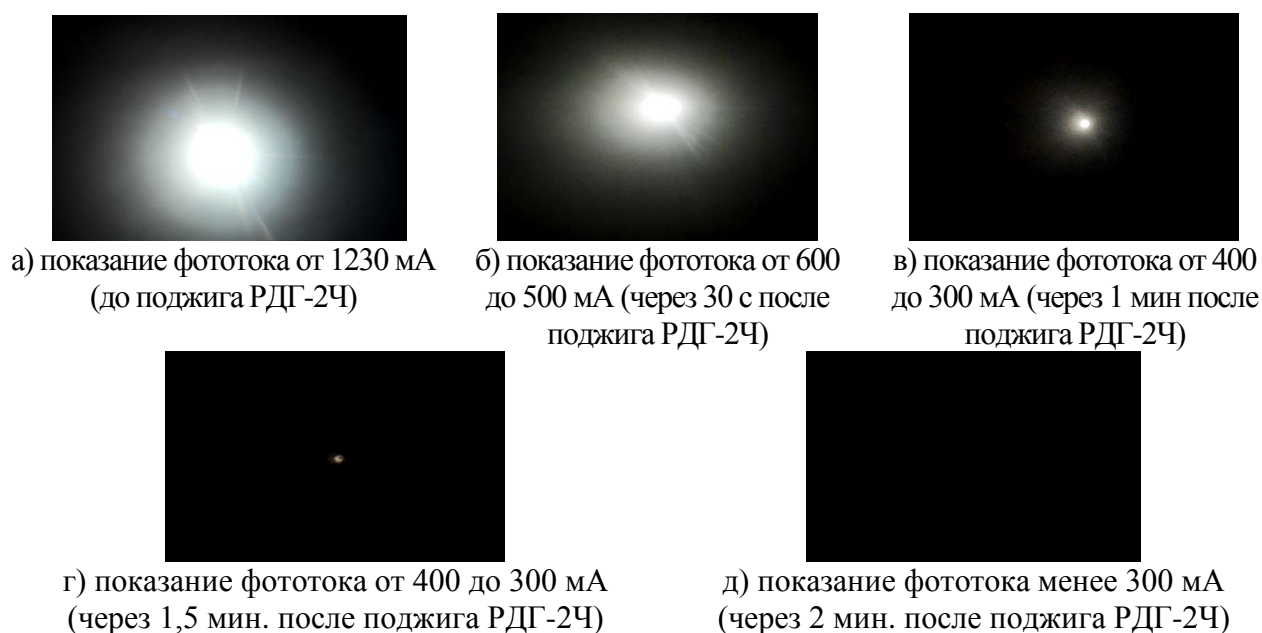


Рисунок 5.28 – Фиксация светового потока от фанаря в процессе заполнения дымокамеры продуктами горения

3) через вход №2 (рисунок 5.26) производилась подача ВСМФС с расходом 0,35 кг/с в течение 1 мин;

4) после прекращения подачи ВСМФС выжидалась пауза (1 мин.);

5) через вход №1 (рисунок 5.26) производилась подача распыленной воды силами одного звена ГДЗС. После прохода звена ГДЗС проводилось проветривание дымокамеры.

Изменение фототока (светопроницаемость среды) в ходе проведения эксперимента представлено на рисунке 5.29. Изменение видимости после подачи ВСМФС и последующего распыления холодной воды соответствует участку III.

Аналогично эксперимент был выполнен с использованием разработанного УОА. В процессе полного заполнения аэрозолем (продуктами горения) помещения, по команде звеном ГДЗС через вход №2 заносилось УОА. К устройству подавалась вода с температурой 180 °С при давлении 2 МПа. Команда на выключение устройства давалась по мере того, как визуально фиксировали смену черного дыма на парокapельную среду. После фиксации фотодиодом постоянной величины светопропускаемости среды давалась команда на подачу к УОА холодной воды. В результате парокapельная среда принудительно попадала в корпус устройства, окончательно конденсировалась, и происходила полная очистка помещения. Изменение фототока (светопроницаемость среды) в ходе проведения эксперимента представлено на рисунке 5.30.

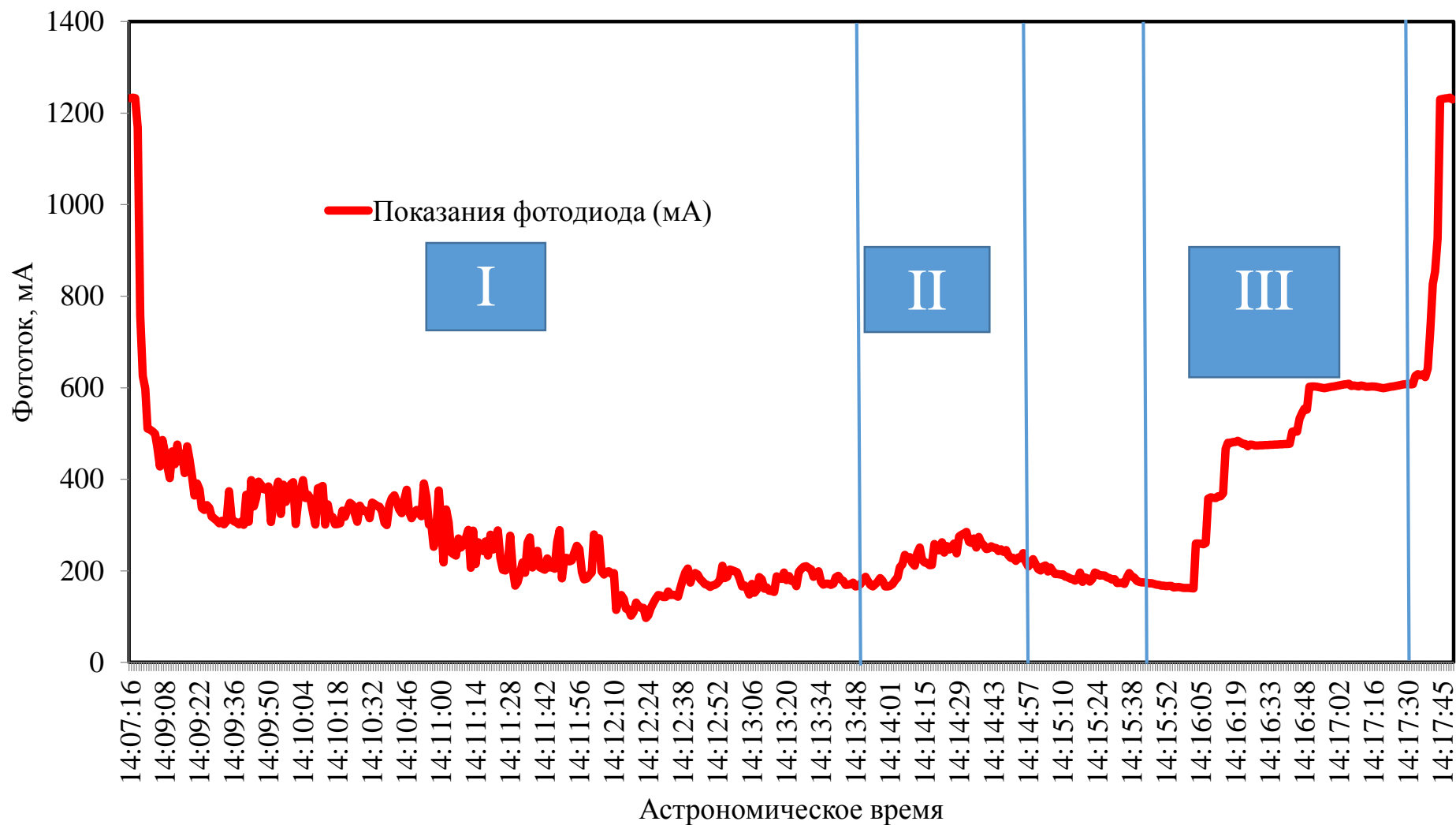


Рисунок 5.29 – Изменение фототока при горении РДГ-2Ч и осаждении продуктов горения ВСМФС:

I – участок показаний фотодиода при горении РДГ-2Ч (среднее значение – 268,5 мА); II – участок показаний фотодиода при вводе ствола ВСМФС (среднее значение – 234,5 мА); III – участок показаний фотодиода при вводе распыленной воды (среднее значение – 483,4 мА)

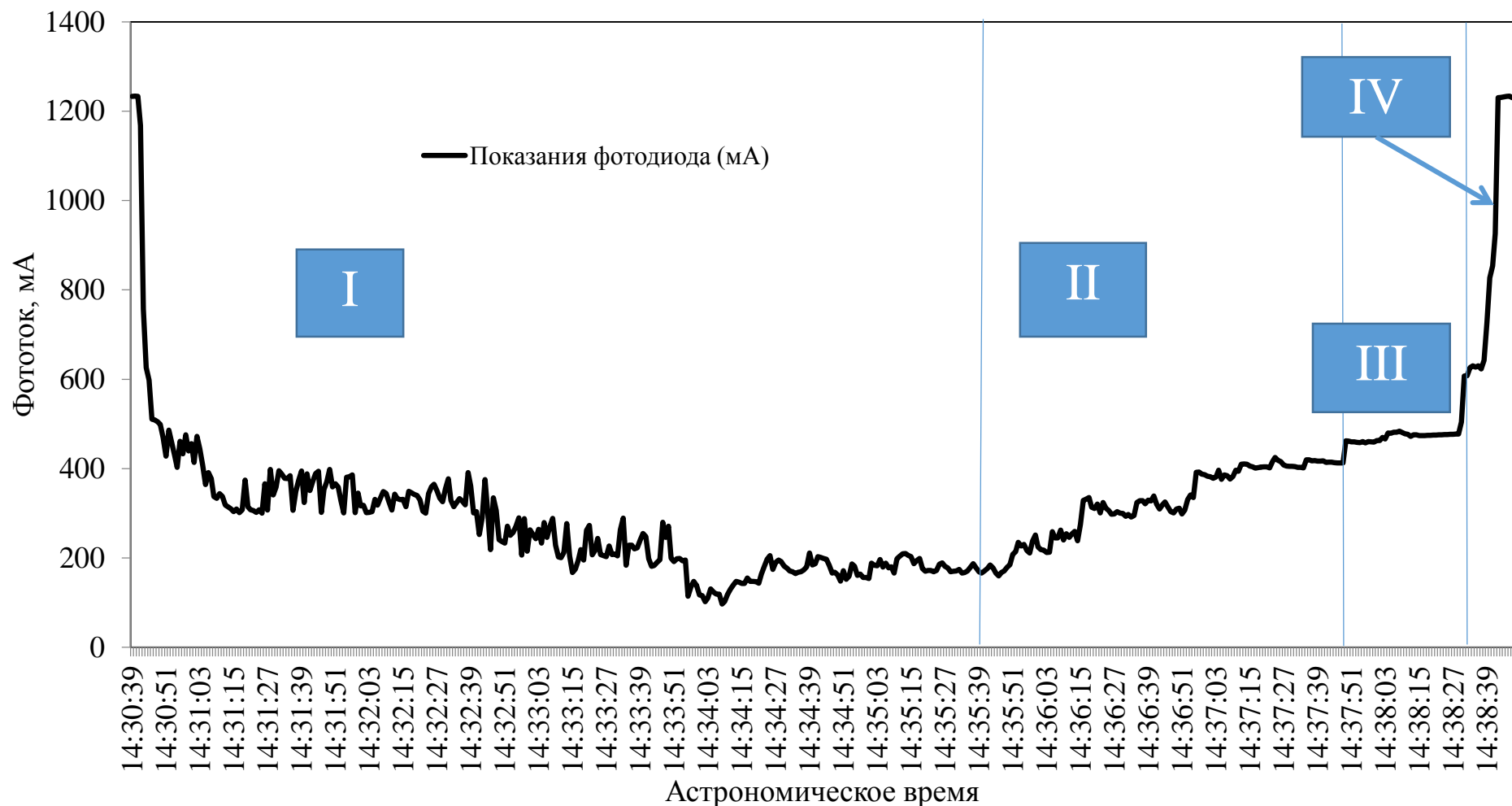


Рисунок 5.30 – Изменение фототока при горении РДГ-2С и осаждении продуктов горения устройством для осаждения аэрозолей: I – участок показаний фотодиода при горении РДГ-2С (среднее значение – 258,5 мА); II – участок показаний фотодиода при работе УОА (среднее значение – 328,5 мА); III – участок показаний фотодиода при полной очистке воздуха от продуктов горения, объем заполнен парок капельной средой (среднее значение – 424,8 мА); IV – участок показаний фотодиода при полной очистке воздуха от парок капельной среды путем подачи к УОА холодной воды (среднее значение – 424,8 мА)

Анализируя данные графиков, представленных на рисунках 5.29 и 5.30, можно сделать следующие выводы:

1) в процессе горения РДГ-2Ч удается вывести из взвешенного состояния различной степени дисперсности дымовые частицы при помощи струй ВСМФС;

2) струи ВСМФС, вводимые во весь объем помещения, долгое время находятся во взвешенном состоянии с поглощенными продуктами горения, тем самым снижается эффект очистки воздуха. Для быстрой очистки воздуха приходится вводить дополнительные струи холодной крупнораспыленной воды (капли размером более 1 мм);

3) использование УОА позволяет полностью очистить воздух от дыма (аэрозольных частиц) и заменить его на чистую парокапельную среду в помещении объемом 100 м<sup>3</sup> за 2,5 мин. Для полной очистки помещения (от парокапельной среды) понадобилось от 40 с до 1 мин., при этом связывание парокапельной среды производилось путем подачи холодной воды (до 30 °С) в УОА;

4) учитывая широкий диапазон дыма от микронных и грубодисперсных частиц, генерируемых РДГ-2Ч, можно сделать вывод, что УОА позволяет выводить из взвешенного состояния частицы данного спектра.

Сравнение эффективности действия и удобства использования предложенных способов осаждения дыма предполагает каждому из них свой сектор применения. К достоинству способа, реализуемого при помощи УОА, относится скорость осаждения, а к недостатку – необходимость перемещения устройства. В то же время этот недостаток является достоинством способа, реализуемого распылением ВСМФС в объеме и последующим осаждением распыленной водой.

Способ, реализуемый при помощи УОА, может найти применение в системах борьбы с дымом, как оперативного применения, так и в стационарном исполнении. Способ осаждения при помощи струй ВСМФС более применим для пожарных в условиях пожара.

Используя описанные выше способы осаждения дыма, пожарные смогут преодолеть зоны задымления, обеспечив приемлемый уровень риска. При решении проблемы доступа к зоне горения для пожарных логично возникает вопрос об обеспечении их эффективными средствами тушения. В параграфе 5.1 теоретически обосновано, что среда

ВСМФС может выступать в качестве такого средства тушения. Поэтому исследования в области совершенствования устройства осаждения аэрозолей были продолжены: принято решение модернизировать конструкцию с целью повышения функциональности устройства. Идея заключалась в повышении эргономичности устройства и возможности его применения в двух режимах. Первый режим работы – осаждение дыма (обеспечение продвижение звена ГДЗС в задымленном объеме); второй режим – реализация объемного тушения по мере достижения звеном ГДЗС помещения пожара.

Исходя из поставленной задачи была разработана рабочая конструкторская документация на модифицированное устройство осаждения аэрозолей (рисунок 5.31).

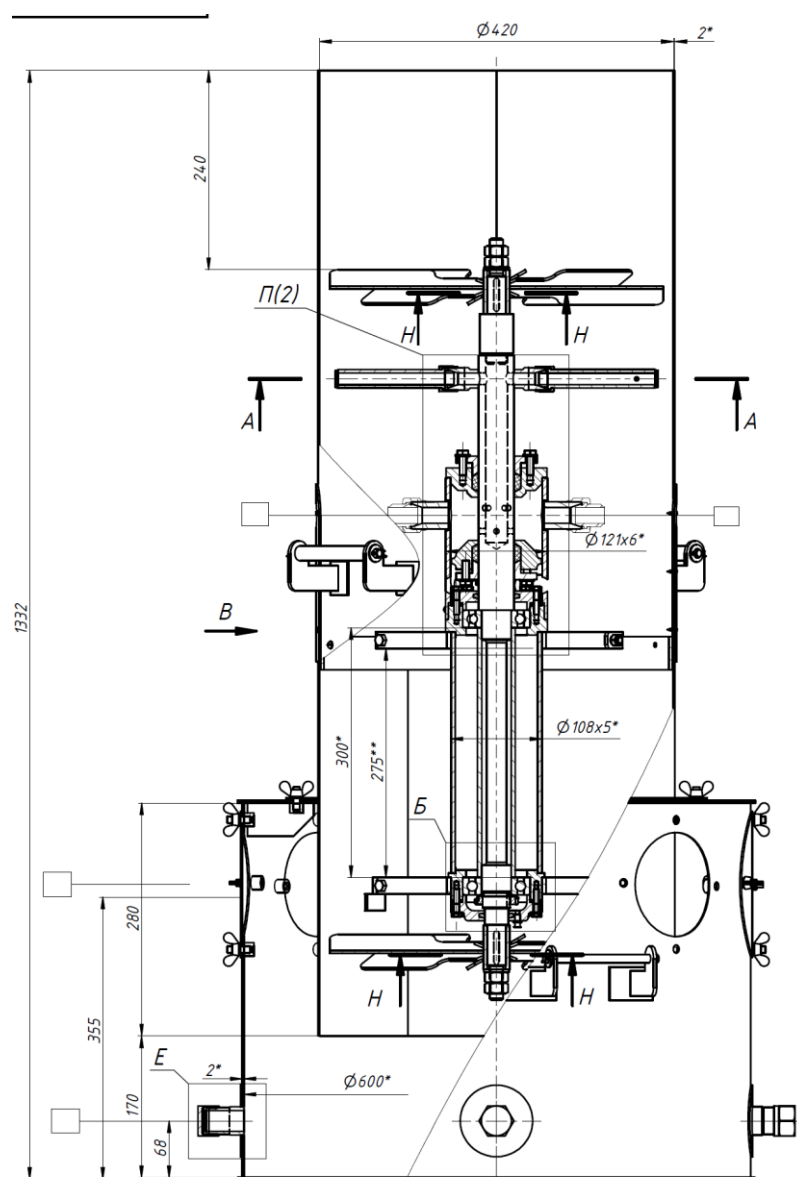


Рисунок 5.31 – Сборочный чертеж модифицированного устройства осаждения аэрозолей



В представленной конструкции была изменена верхняя часть устройства, где предусмотрена возможность быстрого ее съема для обеспечения выхода на режим подачи струй ВСМФС к зоне горения: за счет установки второй крыльчатки увеличилась скорость потока. Таким образом, верхняя часть устройства стала способна работать как дымосос (рисунок 5.32), причем с производительностью, сопоставимой с пожарными дымососами.



Рисунок 5.32 – Общий вид и работа верхней части устройства осаждения аэрозолей

а) вид разобранного устройства осаждения аэрозолей;

б), в) работа устройства в режиме тушения

Таким образом, верхняя часть устройства способна реализовать объемное тушение пожара.

Этапы работы звена ГДЗС с устройством осаждения аэрозолей представлены на рисунке 5.33.

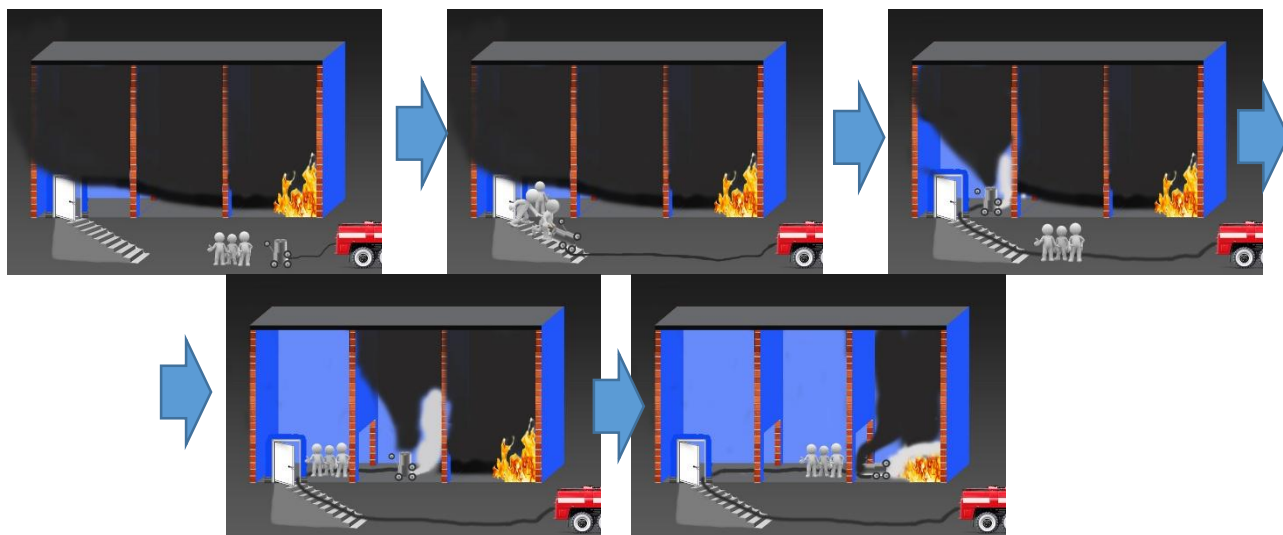


Рисунок 5.33 – Этапы работы звена ГДЗС при тушении пожаров посредством модифицированного устройства осаждения аэрозолей

Ранее проводились пробные эксперименты по тушению различных видов горючих нагрузок ВСМФС как поверхностным, так и объемным способом. В ходе проведения экспериментов была подтверждена высокая огнетушащая способность парок капельных струй, полученных с помощью технологии ВСМФС, но не было количественной оценки эффективности, а именно интенсивности подачи ВСМФС, при которой невозможно дальнейшее горение. В случае рассмотрения поверхностного тушения пожара ВСМФС возможно использовать интенсивности по аналогии с тонкораспыленной водой. Хотя здесь требуется уточнение интенсивности подачи ВСМФС в сторону уменьшения, так как при подаче к зоне горения ВСМФС эффективность парок капельных струй выше по сравнению с тонкораспыленной водой. В случаях объемного тушения ближайшими аналогами для данной технологии тушения пожара могут выступать различные стационарные системы объемного пожаротушения. Однако разработанные нормативы для данных систем не могут быть использованы в случае тушения пожара объемным способом ВСМФС, так как прекращение горения достигается за счет механизмов флегматизации или ингибирования, что характерно для газа, который существенно отличается от ВСМФС.

Поэтому появилась необходимость провести серию натуральных экспериментов на реальных объектах энергетики для определения требуемой интенсивности подачи ВСМФС для прекращения пламенного горения.

### **5.3 Исследование локализации пожаров в зданиях объектов энергетики объемным способом от мобильных средств пожаротушения**

Для определения эффективности применения струй ВСМФС, как объемного средства тушения пожаров, проведена серия натуральных экспериментов. Исследовалась возможность использования воды в метастабильном фазовом состоянии при тушении пожаров объемным способом и определение параметров тушения пожаров в условно герметичных объемах от мобильных средств пожаротушения.

Сущность метода определения показателей эффективности прекращения пламенного горения и снижения ОФП заключается в выявлении отношения минимального количества вещества, необходимого для подавления пламенного горения горючего материала в объеме помещения. В ходе экспериментов определению подлежали показатели, характеризующие пламеподавляющую способность ВСМФС при горении модельных очагов в условно герметичном объеме:

- концентрация или удельный расход ОТВ в условно герметичном объеме для объемного подавления горения модельных очагов (огнетушащая способность), кг/м<sup>3</sup>;
- интенсивность подачи в условно герметичном объеме, кг/(м<sup>3</sup>·с);
- время подачи ОТВ, с;
- надежность подавления горения (без повторного возгорания);
- время подавления горения модельных очагов пожара, с.

### 5.3.1 Исследование локализации пожаров объемным способом в комплексе помещений от мобильных средств пожаротушения

Эксперимент был проведен в комплексе из четырех соседних помещений, соединенных дверными проемами с ограждающими конструкциями из негорючих материалов объемом  $254 \text{ м}^3$  с суммарным параметром негерметичности для группы помещений  $0,012 \text{ м}^{-1}$ . При этом соотношение приточного проема к вытяжному составляло 2:1. Наличие тяги обеспечивалось перепадом высот верха приточного и низа вытяжного проемов, равного 0,5 м.

Модельные очаги располагались в помещениях на высотах 300, 1200 и 2400 мм относительно пола. Каждый очаг размещался на расстоянии 50 мм от стены помещения и не менее 200 мм от потолка. Очаги не располагались вблизи друг друга и один над другим, чтобы не оказывалось влияние на процесс горения соседнего очага. Очаги размещались в объеме помещения на креплениях, а в непосредственной близости от очагов размещались датчики температуры (термопары) на расстояниях, определенных при подготовке к проведению эксперимента. Очагами являлись закладки электрокабелей длиной в 1 м в горючей изоляции и цилиндрические горелки из стали по ГОСТ 5632 [284] с внутренним диаметром 100 мм и высотой 200 мм, заполненные бензином марки АИ-93 по ГОСТ 2084 [285] (рисунок 5.34). По мере развития горения и достижения максимальной температуры в соответствии с условиями испытаний начиналась подача среды ВСМФС (рисунок 5.35).

Модельные очаги располагались согласно схеме, представленной на рисунке 5.36, где также представлены планировка помещений и места размещения устройств подачи ВСМФС.

В первой серии экспериментов все очаги представляли собой закладки электрокабелей в горючей изоляции. Во второй серии экспериментов закладки электрокабелей в горючей изоляции были оставлены в кабельном коллекторе (поз. 4-5), а в помещениях (поз. 1, 3 и 2, 6) в качестве очагов были установлены цилиндрические горелки с горючей жидкостью.





Рисунок 5.34 – Модельные очаги кабельной продукции и горючих жидкостей



Рисунок 5.35 – Подача и распространение среды ТАВ по помещениям

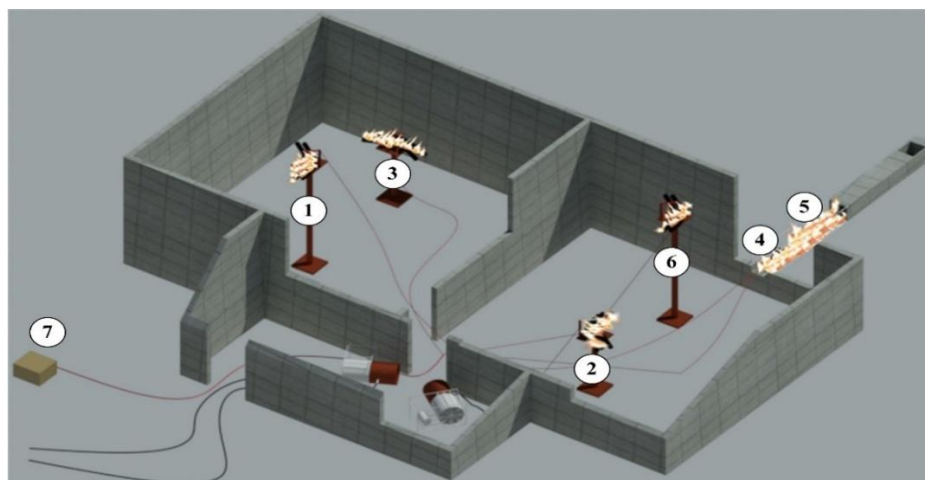


Рисунок 5.36 – Схема расположения модельных очагов пожаров, средств измерения и подачи ВСМФС:

1–6 – места размещения очагов и термопар; 7 – устройство регистрации

Подтверждение тушения пожара производить визуально в помещении, заполненном воздушнокапельной средой, не представлялось возможным, поэтому факт прекращения горения подтверждался по характеру изменения температуры на

термопарах, а также по выходу воздушнокапельной среды из вентиляционной шахты (рисунок 5.37–5.39).



Рисунок 5.37 – Выход дыма из вентиляционной шахты при горении кабельной продукции



Рисунок 5.38 – Выход среды ВСМФС из вентиляционной шахты после прекращения горения кабельной продукции



Рисунок 5.39 – Общий вид кабельной продукции после проведения эксперимента по прекращению открытого горения посредством технологии ВСМФС

В ходе обработки результатов экспериментов определению подлежали показатели, характеризующие пламеподавляющую способность ВСМФС при тушении модельных очагов в условно герметичных объемах.

Удельный расход ОТВ в условно герметичном объеме для объемного тушения модельных очагов определялся по формуле:

$$q_T^{СОП} = Q_{OC} / П, \quad (5.40)$$

где  $Q_{OC}$  – расход огнетушащего средства во время проведения опыта, кг/с;

$П$  – величина расчетного параметра пожара (объем), м<sup>3</sup>.

Огнетушащая интенсивность подачи ОТВ в условно герметичном объеме определялась по формуле:

$$I_T^{COП} = Q_{OC} / t_{OT} . \quad (5.41)$$

Результаты эксперимента сведены в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты экспериментальных исследований подавления пламенного горения средой ВСМФС в условно герметичных объемах

Номер серии экспериментов	Время подавления горения модельных очагов $t_{OT}$ , с	Расход воды $Q_{OC}$ , кг/с	Параметр негерметичности помещений, $m^{-1}$	Интенсивность подачи ВСМФС $I_T^{COП}$ , $кг/(m^3 \cdot c)$
1	50	1,26	0,012	0,005
2	250	1,21	0,012	0,0048

В первой серии экспериментов, когда очагами служили закладки кабельной продукции в горючей изоляции, открытое горение всех шести очагов было прекращено в течение 50 с.

Во второй серии экспериментов в условиях снижения интенсивности подачи ВСМФС, пламенное горение было прекращено лишь у закладок кабельной продукции в горючей изоляции, находящейся в кабельном коллекторе. Горение очагов горючей жидкости при данной интенсивности не было достигнуто и после 250 с подачи среды ВСМФС. Это может быть объяснено недостаточной интенсивностью подачи при заданном параметре негерметичности.

При проведении экспериментов установлено, что ВСМФС обладает свойствами огнетушащих составов объемного пожаротушения. Подача среды ВСМФС может быть осуществлена через соседнее с горящим помещение при условии открытого проема. Показатель пламеподавляющей способности (интенсивность подачи ВСМФС) является необходимым, но недостаточным для успешного тушения пожаров в условно герметичных объемах. На пламеподавляющую способность влияние оказывает время подачи ВСМФС в помещение и параметр негерметичности, которые определяют удельный расход в условно герметичном объеме для объемного тушения.

Базовым показателем для подавления горения в условно герметичном объеме с параметром негерметичности  $0,012 \text{ м}^{-1}$  при горении кабельной продукции является интенсивность подачи воды в метастабильном фазовом состоянии, равная  $0,005 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ .

### 5.3.2 Исследование локализации пожаров объемным способом в протяженном тоннеле от мобильных средств пожаротушения

Для более полного представления возможностей технологии ВСМФС в обеспечении тушения пожаров объектов энергетики проведен ряд экспериментов по прекращению пламенного горения отдельных материалов в характерных для объектов энергетики помещениях и сооружениях. Также проведена серия экспериментов в протяженных замкнутых сооружениях с различной степенью негерметичности. Выбор объекта эксперимента обусловлен необходимостью подтверждения возможности использования ВСМФС для объемного тушения в протяженных замкнутых сооружениях, таких как кабельные тоннели.

Нормативные документы по проектированию атомных станций требуют, чтобы кабельные протяженные сооружения разделялись перегородками с пределом огнестойкости EI45 на отсеки длиной не более 50 м [43]. Поэтому при выборе защищаемого объема помещения при проведении эксперимента руководствовались, что отсек кабельного коллектора не будет превышать 50 м.

Экспериментальные исследования проводились на теплоэнергетической централи г. Владивостока. В качестве места проведения эксперимента был выбран тоннель цилиндрической формы с ограждающими конструкциями из негорючих материалов диаметром 2 м и длиной 860 м (рисунок 5.40).

За величину расчетного объема был принят защищаемый объем помещения ( $157 \text{ м}^3$ ) со степенью негерметичности  $0,0217 \text{ м}^{-1}$  (при расчете степени негерметичности учтено, что со стороны подачи ВСМФС неприкрытым оставалось отверстие площадью  $0,26 \text{ м}^2$ , а с противоположной стороны – вся площадь поперечного сечения тоннеля –  $3,14 \text{ м}^2$ ).

Для модельных очагов в качестве горючего вещества использовались кабели длиной до 1,2 м без защитного покрова с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластика, изоляцией из полиэтилена и оболочкой из поливинилхлоридного пластика, изоляцией из вулканизированного пластика, с количеством алюминиевых



жил от 3 до 4 штук и площадью их поперечного сечения от 70 до 150 мм<sup>2</sup>. Модельные очаги располагались в объеме тоннеля на расстоянии 21, 27, 33, 39 м от входа и на высоте 80, 120, 80, 120 см от нижней точки тоннеля соответственно (рисунок 5.41).



Рисунок 5.40 – Общий вид тоннеля для проведения натурных экспериментов



Рисунок 5.41 – Общий вид модельного очага в тоннеле

В непосредственной близости от модельных очагов размещались датчики температуры (термопары) на расстояниях, определенных при подготовке к проведению эксперимента. На металлических специальных стойках (креплениях), используемых для моделирования очага, выкладывались от 15 до 30 кабелей различных марок. Очаги располагались на расстоянии 6 м друг от друга, чтобы исключить воздействие на процесс горения соседнего очага. Каждый очаг размещался на расстоянии 50 см от ограждающих конструкций по горизонтали и 20 см по вертикали. Схема размещения модельных очагов представлена на рисунке 5.42.

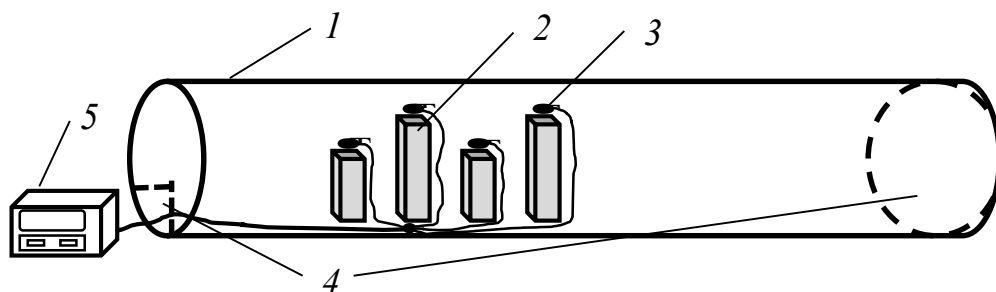


Рисунок 5.42 – Схема расположения модельных очагов и средств измерения в тоннеле:

1 – тоннель; 2 – модельный очаг; 3 – термопары (Т1-Т4); 4 – открытый проем;  
5 – устройство регистрации данных

Время свободного горения после поджига составляло от 5 до 8 мин с обеспечением постоянного доступа воздуха в объем тоннеля через отверстия площадью  $1,7 \text{ м}^2$  со стороны подачи ОТВ, и площадью  $3,14 \text{ м}^2$  с противоположной ко входу части тоннеля (рисунок 5.43). В качестве ОТВ применялись струи ВСМФС, подача которых производилась по набору максимальной температуры свободного горения (рисунок 5.44).



Рисунок 5.43 – Фрагмент свободного горения модельного очага



Рисунок 5.44 – Оконечное устройство подачи ВСМФС

Подача ВСМФС осуществлялась через вход в тоннель, перекрытый металлическим листом, где после набора максимальной температуры горения модельных очагов неприкрытым оставалось отверстие площадью  $0,26 \text{ м}^2$ , а также не перекрывалась противоположная ко входу часть тоннеля. Через указанные проемы осуществлялся газообмен. Струи ВСМФС подавались так, чтобы не оказывать на модельные очаги прямого воздействия.

Визуальная регистрация факта тушения пожара в помещении, заполненном воздушнокапельной средой, не представлялась возможной, поэтому ее осуществляли по изменению температуры, регистрация которой производилась с помощью термопар. За время подачи ОТВ была принята разница времени между началом подачи ВСМФС и временем, когда значение температуры на всех модельных очагах опустится ниже  $100 \text{ °C}$ , так как при данной температуре исключена возможность повторного возгорания. Результаты отдельных экспериментов в графическом виде представлены на рисунках 5.45–5.48.

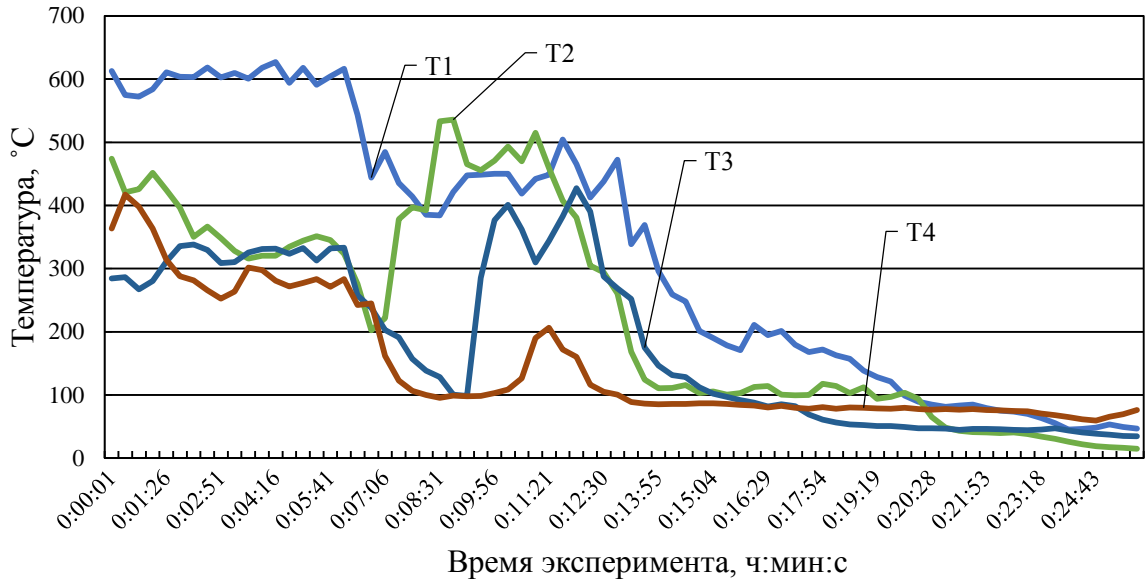


Рисунок 5.45 – Изменение температуры возле модельных очагов при проведении эксперимента № 1:

— Температура T1, °C      — Температура T2, °C  
 — Температура T3, °C      — Температура T4, °C

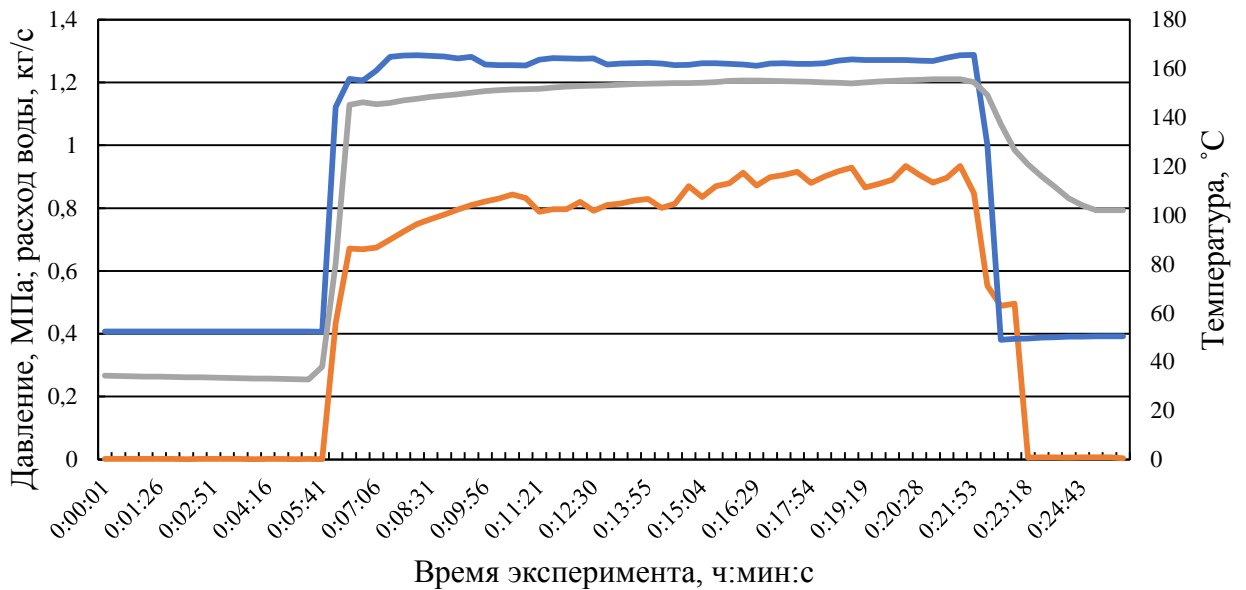


Рисунок 5.46 – Параметры работы установки получения ВСМФС

при проведении эксперимента № 1:

— Давление P, МПа    — Расход воды q, кг/с    — Температура воды t, °C

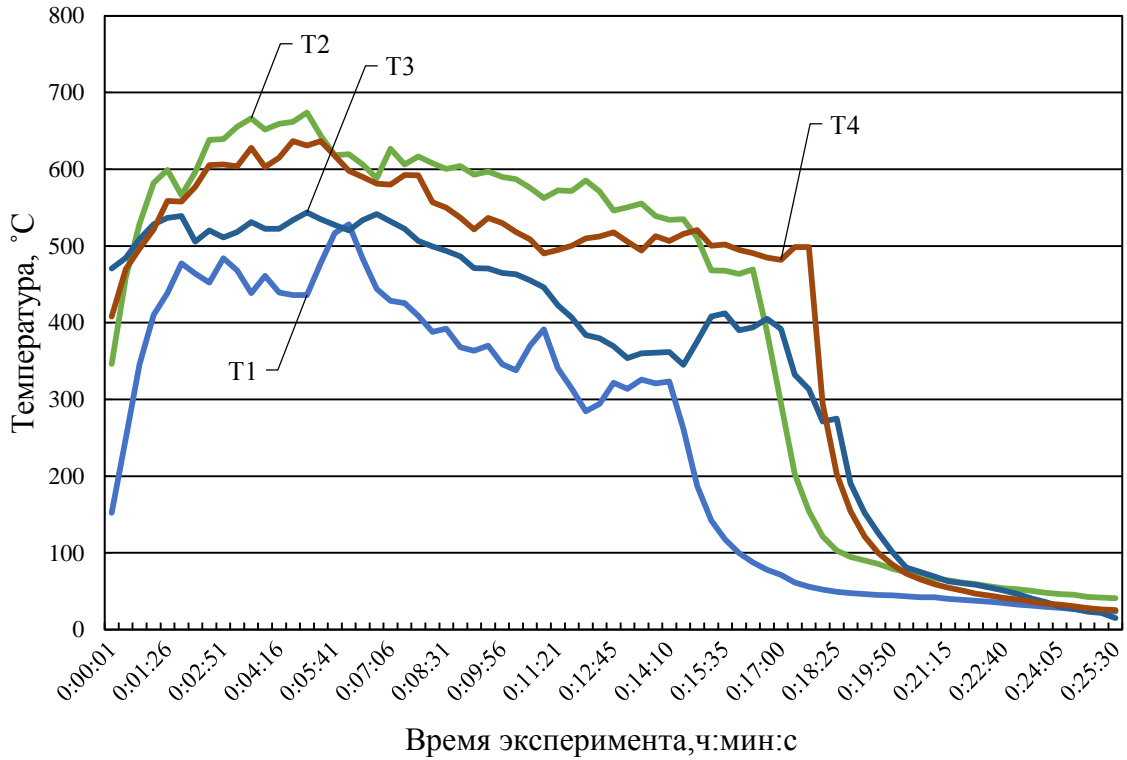


Рисунок 5.47 – Температура возле модельных очагов во времени

при проведении эксперимента № 2:

- Температура T1, °C
- Температура T2, °C
- Температура T3, °C
- Температура T4, °C

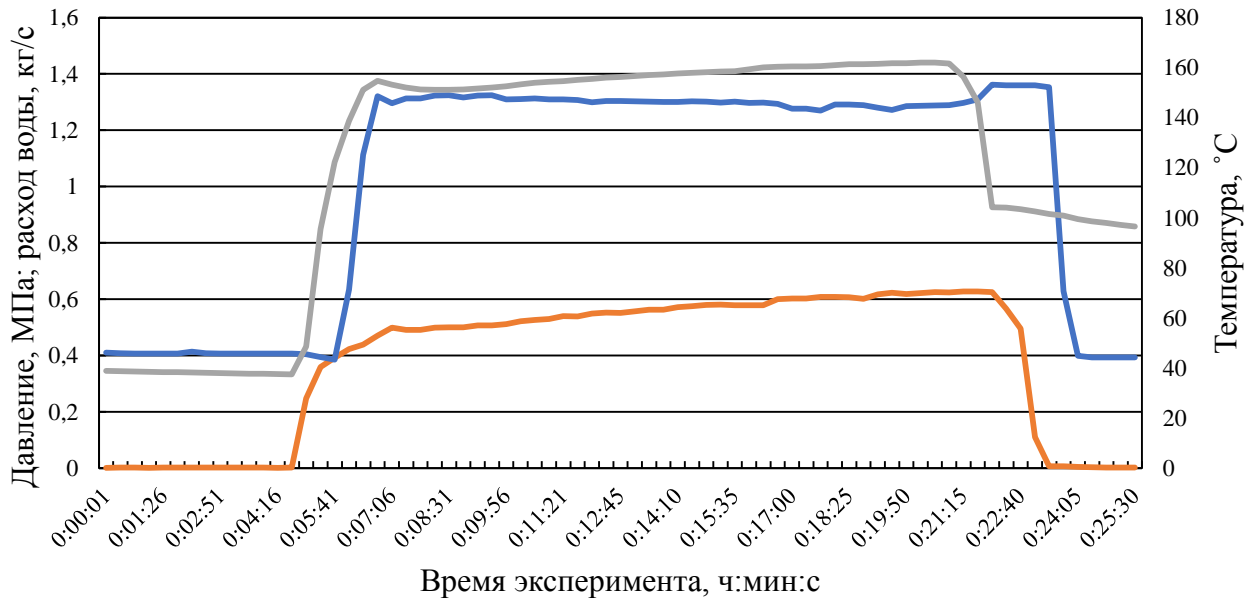


Рисунок 5.48 – Параметры работы установки получения ВСМФС

при проведении эксперимента № 2:

- Давление P, МПа
- Расход воды q, кг/с
- Температура воды t, °C

После каждого эксперимента проводилось проветривание тоннеля при помощи дымососа. При обработке результатов экспериментов определялись показатели, характеризующие пламеподавляющую способность ВСМФС при тушении модельных очагов в условно герметичных объемах.

Удельный расход ВСМФС в условно герметичном объеме для объемного тушения модельных очагов определялся по формуле:

$$q_T^{\text{ВСМФС}} = Q_{\text{НВ}} \cdot t_{\text{ПГ}} / \Pi, \quad (5.42)$$

где  $Q_{\text{НВ}}$  – расход недогретой воды во время проведения опыта, кг/с;

$\Pi$  – защищаемый объем (величина расчетного параметра пожара), м<sup>3</sup>;

$t_{\text{ПГ}}$  – время подавления горения модельных очагов пожара, с.

Пламеподавляющая интенсивность подачи ВСМФС в условно герметичном объеме определялась по формуле:

$$I_T^{\text{ВСМФС}} = Q_{\text{НВ}} / \Pi. \quad (5.43)$$

Подставляя численные значения, полученные опытным путем для помещения со степенью негерметичности 0,022 м<sup>-1</sup> и защищаемым объемом 157 м<sup>3</sup>, получаем результаты, представленные в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Экспериментальные и расчетные показатели, характеризующие пламеподавляющую способность ВСМФС при тушении модельных очагов в условно герметичных объемах

Номер эксперимента	Время тушения модельных очагов, $t_{\text{ПГ}}$ , с	Расход недогретой воды, $Q_{\text{НВ}}$ , кг/с	Пламеподавляющая интенсивность подачи ВСМФС, $I_T^{\text{ВСМФС}}$ , кг/(м <sup>3</sup> ·с)	Удельный расход ВСМФС, $q_T^{\text{ВСМФС}}$ , кг/м <sup>3</sup>
1	844	1,2603	0,0080	6,752
2	828	1,2963	0,0083	6,872
3	671	1,2764	0,0081	5,435
4	1037	1,2692	0,0081	8,400
5	590	1,2937	0,0082	4,838

В результате выполнения экспериментов установлено, что:

- ВСМФС обладает свойствами, присущими огнетушащим составам объемного пожаротушения;
- удельный расход ВСМФС для пожаротушения объемным способом в протяженных замкнутых сооружениях изменяется от 4,8 до 8,4 кг/м<sup>3</sup>;
- среднее значение интенсивности подачи ВСМФС для успешного подавления пламенного горения составляет  $8,1 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>3</sup>·с);
- минимальное время подачи ОТВ на тушение пламени в протяженных замкнутых сооружениях энергообъектов составляет 590 с.

Полученные результаты доказывают, что технология ВСМФС применима для объемного тушения протяженных замкнутых объектов с горючей нагрузкой, характерной для объектов энергетики.

### **5.3.3 Исследование локализации пожаров объемным способом в кабельном коллекторе зигзагообразной формы от мобильных средств пожаротушения**

Следующая серия экспериментов была проведена в зигзагообразном коллекторе, где в качестве горючей нагрузки использовались маслонаполненные кабели.

Значительная часть кабельных коллекторов – это сооружения со сложной геометрической планировкой. Поэтому возможность использования технологии ВСМФС для объемного тушения необходимо было проверить на объекте нелинейной формы. Для данного исследования был выбран макет кабельного коллектора зигзагообразной формы с геометрическими размерами; высота – 2 м, ширина – 3 м, суммарная длина – 30 м (рисунок 5.49).





Рисунок 5.49 – Общий вид макета кабельного коллектора зигзагообразной формы

За величину расчетного объема был принят защищаемый объем помещения  $180 \text{ м}^3$  со степенью негерметичности  $0,009 \text{ м}^{-1}$  (при расчете степени негерметичности учтено, что со стороны подачи ВСМФС неприкрытым оставался дверной проем площадью  $1,68 \text{ м}^2$ ).

Пожарная нагрузка размещалась на лотках вдоль стен тоннеля, равномерно заполняя их. Горючая нагрузка (отходы кабельной продукции в горючей изоляции) располагалась продольно по длине лотков в два яруса (рисунок 5.50).



Рисунок 5.50 – Расположение горючей нагрузки в коллекторе

Проекциями точек расположения термодпар являлись точки, расположенные у стены рядом с горючей нагрузкой на расстоянии от входа соответственно 1,5; 6,5; 11,5; 17; 23; 27 и 30 м (рисунок 5.51). В каждой указанной точке устанавливались по три термодпары на высоте 0,4; 1,4 и 1,8 м.

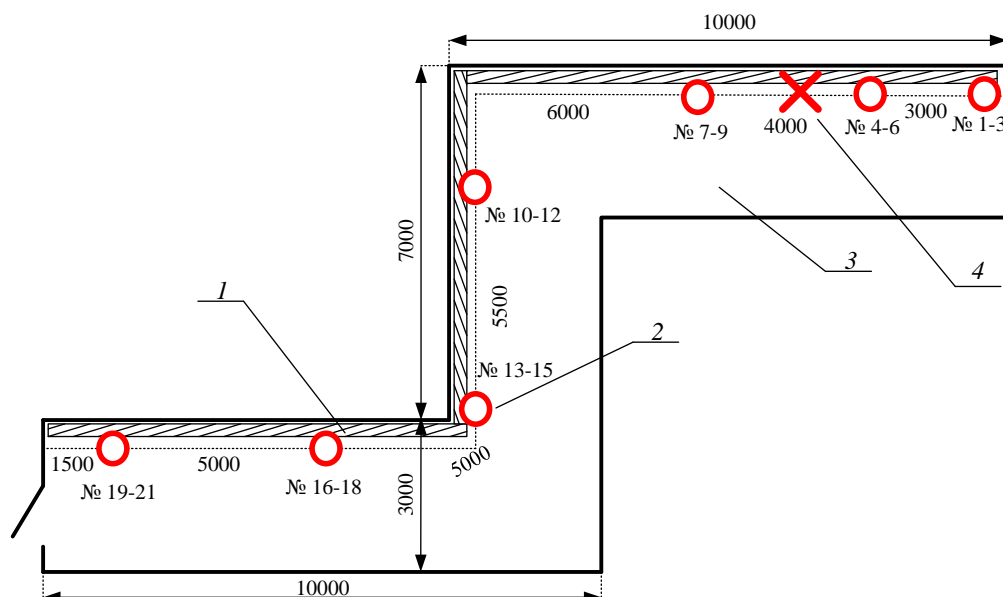


Рисунок 5.51 – Схема кабельного коллектора и расположения термомпар:

1 – место расположения горючей нагрузки; 2 – термомпары;

3 – номер термомпары; 4 – место очага пожара

Время свободного горения после поджига лимитировалось повышением температуры внутри кабельного коллектора до 300 °С по показаниям двух термомпар (рисунок 5.52).



Рисунок 5.52 – Фрагменты свободного горения кабельной продукции

В качестве ОТВ применялись струи ВСМФС, подача которых производилась по набору максимальной температуры (рисунок 5.53).





Рисунок 5.53 – Общий вид окончных устройств установки подачи ВСМФС

Газообмен и подача ВСМФС осуществлялись через вход в кабельный коллектор. Струи ОТВ подавались так, чтобы не оказывать на очаг прямого воздействия.

Визуальная регистрация факта тушения пожара в помещении, заполненном воздушнокапельной средой, не представлялась возможной, поэтому она осуществлялась по изменению температуры на термопарах. За время подачи ОТВ была принята разница времени между началом подачи ВСМФС и времени, когда показания, снимаемые с термопар, составляли менее  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а также прекращалось дымовыделение (через открытый проем выходила только ВСМФС) (рисунок 5.54).



а

б

Рисунок 5.54 – Фрагмент фиксации прекращения пламенного горения:

а) выход продуктов горения до подачи ВСМФС; б) выход ВСМФС

На рисунке 5.55 отображены показания термопар (Т-4, Т-5, Т-6, Т-10), регистрирующих температуру при введении ВСМФС. Время фиксации прекращения

пламенного горения производилось при соблюдении двух условий: разброса показаний всех термопар менее 60 °С и выхода через проем только ВСМФС, и составило 660 с. Средний расход недогретой воды составил 1,15 кг/с.

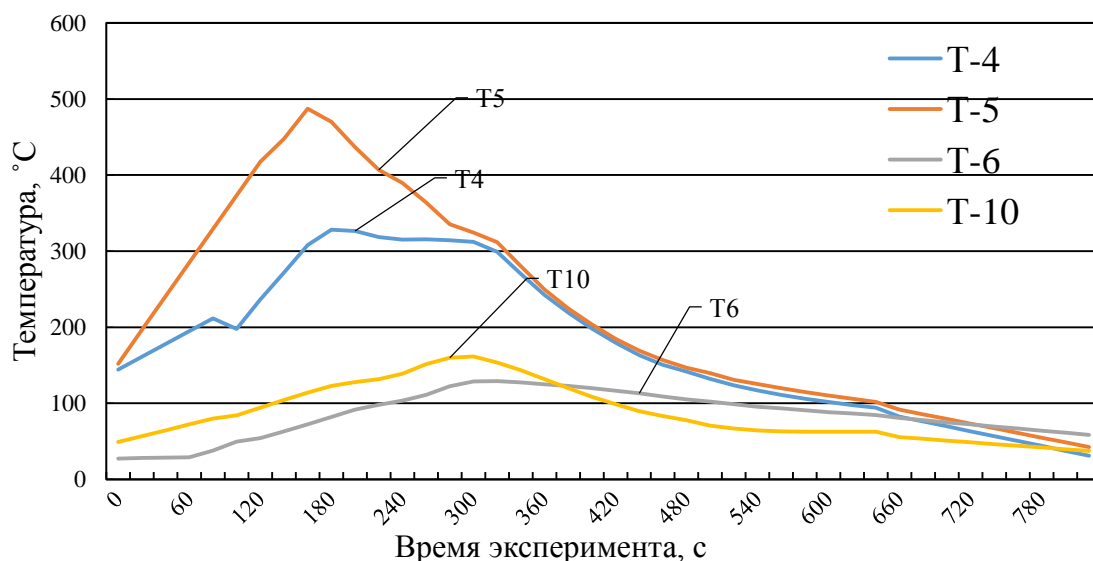


Рисунок 5.55 – Динамика температуры в кабельном коллекторе

При обработке результатов эксперимента определялись показатели, характеризующие пламеподавляющую способность ВСМФС при тушении кабельного коллектора.

Удельный расход ВСМФС в условно герметичном объеме для объемного тушения определялся по формуле (5.10), а пламеподавляющая интенсивность подачи ВСМФС в условно герметичном объеме – по формуле (5.43). Подставляя численные значения, полученные опытным путем для помещения со степенью негерметичности  $0,009 \text{ м}^{-1}$  и защищаемым объемом в  $180 \text{ м}^3$ , получаем результаты, которые представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Экспериментальные и расчетные показатели, характеризующие пламеподавляющую способность ВСМФС при тушении модельных очагов в условно герметичных объемах

Номер эксперимента	Время тушения пламенного горения изоляции кабелей, $t_{\text{ПГ}}$ , с	Расход недогретой воды, $Q_{\text{НВ}}$ , кг/с	Пламеподавляющая интенсивность подачи ВСМФС, $I_{\text{T}}^{\text{ВСМФС}}$ , кг/( $\text{м}^3 \cdot \text{с}$ )	Удельный расход ВСМФС, $q_{\text{T}}^{\text{ВСМФС}}$ , кг/ $\text{м}^3$
1	660	1,15	0,0064	4,217
2	554	1,08	0,0060	3,324
3	590	1,17	0,0065	3,835

В результате выполнения эксперимента установлено, что:

- удельный расход ВСМФС для подавления пламени объемным способом в коллекторе зигзагообразной формы изменяется от 4,217 до 3,324 кг/м<sup>3</sup>;
- среднее значение интенсивности подачи ВСМФС составило  $6,3 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>3</sup>·с);
- время подачи ОТВ на тушение пламени в кабельном коллекторе зигзагообразной формы составило от 9,23 до 11 мин.

Полученные результаты подтверждают, что технология ВСМФС позволяет получить парокапельную смесь, которая огибает препятствия и долгое время может находиться во взвешенном состоянии. Впервые получены данные по требуемой интенсивности подачи ВСМФС при горении комбинированной горючей нагрузки (изоляция кабелей, масло). Таким образом, данный способ объемного тушения позволяет:

- подавлять пламенное горение комбинированной горючей нагрузки в кабельных сооружениях сложной планировки на расстоянии до 30 м от места подачи ОТВ;
- снижать температуру внутри кабельного коллектора до 60 °С и менее, то есть до безопасных для человека значений;
- осаждать продукты горения кабельной продукции внутри кабельного коллектора вплоть до выхода из него безопасной ВСМФС.

Основные обобщенные результаты выполненных экспериментов приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Результаты исследования ВСМФС как средства объемного тушения пожара

№ п/п	Объект эксперимента	Параметр негерметичности, м <sup>-1</sup>	Интенсивность подачи ВСМФС, при которой прекращается пламенное горение, кг/(м <sup>3</sup> ·с)
1.	Прямоугольные смежные помещения	0,012	0,005
2.	Протяженный кабельный коллектор	0,022	0,008
3.	Зигзагообразный кабельный коллектор	0,009	0,006

Таким образом, на основе теоретического обзора и натуральных экспериментов

доказано, что парокапельные струи воды, полученные в результате взрывного вскипания, будут эффективным средством объемного тушения пожаров на объектах энергетики, так как:

1) обладая малой инерционностью капель (размер от 0,01 до 10 мкм) среда ВСМФС с легкостью будет заполнять сложные геометрические объемы, не осаждаваясь на стенках ограждающих конструкций;

2) теоретические и экспериментальные данные показали, что среда ВСМФС устойчива (не менее 30 минут находится во взвешенном состоянии) при заполнении замкнутых объемов;

3) среда обладает повышенной теплоотдачей за счет малых размеров капель;

4) значительная часть воды переходит в пар, что приводит к повышению эффективности гашения пламени за счет ингибирования.

Экспериментально определено, что обеспечение интенсивности подачи ВСМФС от 6 до 8 г воды на 1 м<sup>3</sup> достаточно для реализации условий подавления пламени в защищаемом объеме с одновременным снижением других ОФП.

Обеспечение пожарных подразделений мобильными средствами пожаротушения, которые позволяют осуществить объемное тушение пожара значительно повышает тактические возможности подразделений, так как при их использовании личный состав не должен находиться в помещениях пожара в процессе тушения (у зоны горения). На порядок повышается возможность локализации минимальной площади пожара караулом, который может осуществлять объемное тушение. Необходимо только отметить, что мобильными средствами пожаротушения, с помощью которого осуществляется объемное тушение, нужно использовать в качестве ОТВ легко возобновляемый (неиссякаемый) источник с достаточной производительностью. В предложенном способе объемного тушения используется самый распространенный вид ОТВ – вода.

Также учитывая сложность продвижения звена ГДЗС к месту эффективной подачи ОТВ на объектах энергетики в условиях пожара (снижение видимости) был проработан вопрос о разработке способов, реализующих очистку воздуха от дымовых частиц.

На основе технологии разработано мобильное устройство, способное очищать воздух от дымовых частиц с достаточной производительностью и эффективностью, не нагнетающее дополнительный воздух в помещение (т. е. его работа не способствует развитию пожара). За счет ввода ВСМФС происходит снижение температуры и интенсивности горения. Осаждение дыма позволяет улучшить видимость, что поможет адекватно оценивать опасность при тушении пожара, что особенно актуально для объектов энергетики. Для подтверждения эффективности применения предложенного способа и устройства осаждения дыма с помощью технологии ВСМФС проведен ряд натурных экспериментов, которые показали, что после очистки воздуха от продуктов горения повышается светопрозрачность среды более чем в 2 раза. Обеспечение видимости, которая позволит пожарным заметить опасность раньше, чем они могут попасть под ее воздействие, приведет к уменьшению риска получения травм, и быстрее локализовать и ликвидировать пожар.

## ГЛАВА 6 КОНЦЕПЦИЯ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ С УЧЕТОМ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ

### 6.1 Метод локализации пожаров в зданиях объектов энергетики

Задачей метода локализации пожаров в зданиях объектов энергетики является расчетное обоснование комплекса оперативно-тактических и инженерно-технических мероприятий в условиях развития единичного пожара в зданиях объекта энергетики в соответствии с принятой моделью, позволяющих обеспечить тушение пожара в тех размерах, которые не приведут к остановке технологического процесса выработки энергии при условии обеспечения безопасности персонала объекта энергетики. К задаче, решаемой методом, не относятся катастрофические для объекта (запроектные) аварии, когда первичное событие мгновенно приводит к разрушению объекта энергетики или его значительной части. Подобные задачи решить силами пожарной охраны чаще всего не представляется возможным.

Современное состояние противопожарной защиты объектов энергетики свидетельствует о достаточной обеспеченности ОТВ и средствами их подачи, средствами защиты участников тушения пожара от ОФП и их сопутствующих проявлений. Наибольшую сложность в подаче ОТВ в зону горения для своевременной локализации и последующей ликвидации пожара представляет снижение видимости, которое замедляет продвижение через зону задымления. Размер зоны задымления значительно превосходит зоны горения и теплового воздействия, поэтому за время достижения пожарными позиций подачи ОТВ в условиях задымления происходит дальнейшее развитие пожара. По мере достижения зоны горения и начала тушения важным становится непрерывность подачи ОТВ, обеспечение которой затрудняет необходимость смены пожарных на позициях, как по критериям физиологической работоспособности в условиях воздействия ОФП (в большей части высокой температуры), так по израсходованию времени защитного действия средств защиты органов дыхания.

Комплекс мер, применяемых для обеспечения подачи ОТВ в условиях задымления, приведен на рисунках 6.1 и 6.2.



Рисунок 6.1 – Комплекс мер по обеспечению тушения пожара объекта энергетики в условиях задымления

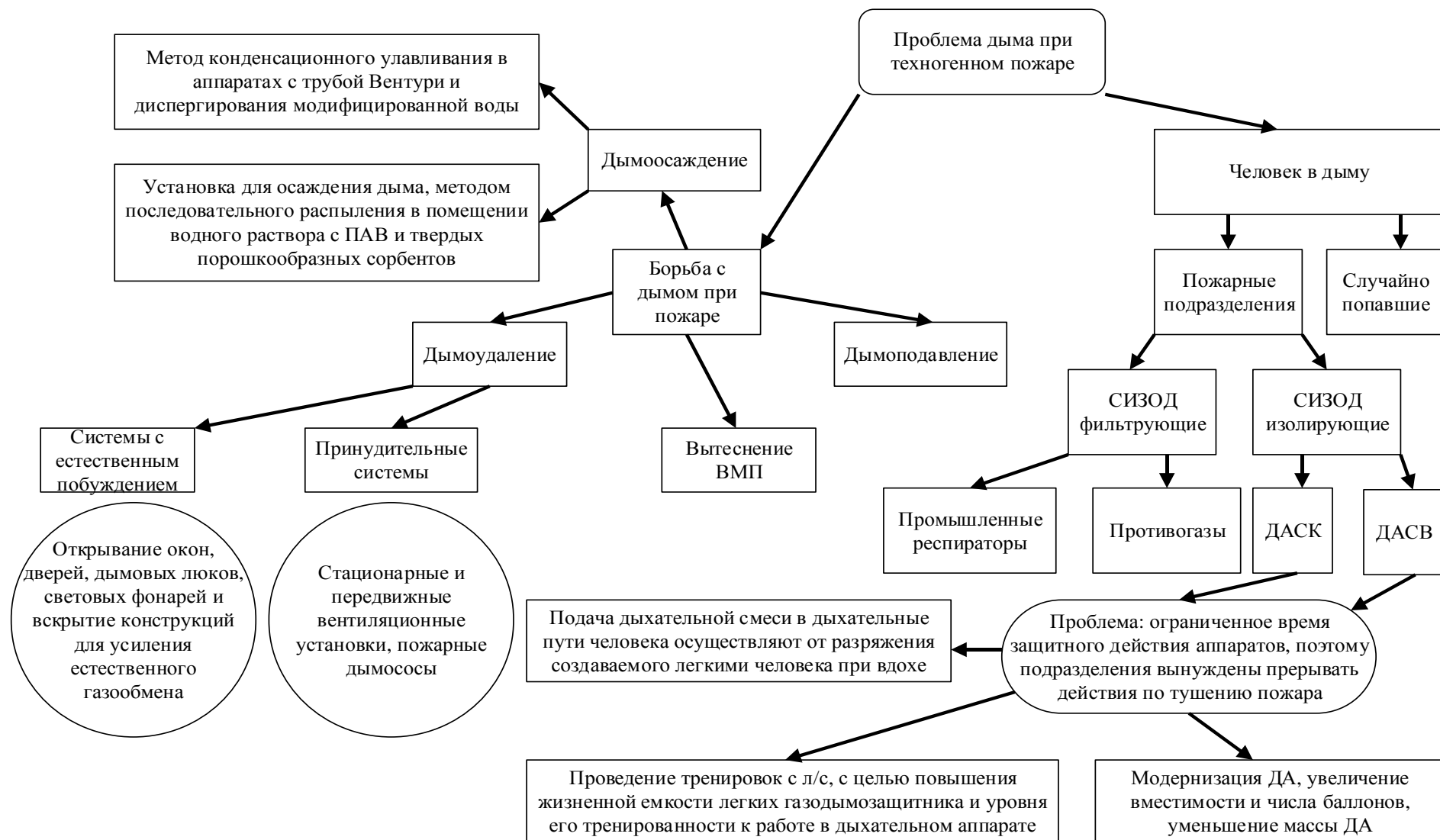


Рисунок 6.2 – Комплекс мер по совершенствованию способов и средств обеспечения тушения пожара объекта энергетики в условиях задымления



Сущность метода состоит в расчете хода тушения пожара объекта энергетики имеющимися силами и средствами пожарно-спасательного гарнизона на основе принятой модели и с использованием статистических закономерностей. Если результат расчета не удовлетворяет цели сохранения работоспособности объекта энергетики, в расчетную схему включаются дополнительные силы или средства, позволяющие оптимизировать (ускорить) процесс тушения. Производится повторный расчет, определяется результат, в зависимости от которого производится добавление, либо замена ресурсов, и расчетный цикл повторяется.

Добавление ресурсов может быть произведено дополнительным привлечением сил с учетом времени их сосредоточения, а замена осуществляется применением технических средств и методов, оптимизирующих тушение пожара. Предполагается, что сочетание привлечения дополнительных сил, применения методов и технических средств оптимизации тушения пожара позволит на основе расчета хода тушения пожара вывести оптимальный вариант организации тушения пожара объекта энергетики.

Метод локализации пожара в зданиях объекта энергетики заключается в последовательном подборе ее схемы с проведением в каждом случае подтверждающего расчета достаточности сил и средств для своевременного и непрерывного тушения пожара. Сочетание получаемых при расчете площади пожара и времени тушения должно показать, выполнение какой задачи выезда дежурного караула достигается для выбранного помещения пожара. Метод позволяет моделировать состав сил, обеспечивающих выполнение любой из задач. Наглядно представить сущность метода можно в виде «весов», на одной из чаш которых находится вероятная модель пожара с соответствующей динамикой, а на другой – силы и средства, способные локализовать данный пожар.

Таким образом, используя разработанную методику можно выполнить расчет задачи по тушению пожара при том или ином соотношении динамики вероятного пожара и сил, осуществляющих его тушение. Блок-схема реализации метода представлена на рисунке 6.3.



Рисунок 6.3 – Метод локализации пожаров в зданиях объектов энергетики

Расчет сил и средств осуществляется по представленному циклу до достижения баланса в соответствии с определенной целью тушения пожара. Наиболее привычным способом достижения баланса является увеличение привлекаемых к тушению пожара сил. В случаях пожара объекта энергетики это не всегда представляется возможным, так как ряд объектов удален от крупных сил ПО. В этом случае приходится либо увеличивать численность объектового ППО, либо предусматривать организационные, и (или) технические мероприятия. При этом наиболее эф-

фективным и, как правило, единственным организационным ходом является привлечение личного состава, свободного от несения службы, однако это невозможно сделать за короткое время. Даже с учетом проживания большей части личного состава в городе-спутнике объекта энергетики на это уходит не менее одного часа.

Технические меры, которые позволят обеспечить тушение пожара, следует предусматривать направленными на:

- бесперебойное обеспечение ОТВ и работоспособности средств их подачи;
- обеспечение возможности непрерывного тушения пожара от момента начальной подачи ОТВ – комплекс мер, позволяющих ствольщикам находиться на позиции с момента начала подачи ОТВ до локализации и последующей ликвидации пожара.

Как отмечалось в анализе решаемой проблемы, обеспеченность объекта энергетики ОТВ и средствами их подачи находится на приемлемом уровне, как и электробезопасность и защищенность от ОФП. Наиболее сложно обеспечить возможность нахождения ствольщиков на позициях подачи ОТВ с момента начала их подачи до локализации и ликвидации пожара.

Важным элементом в обеспечении своевременного тушения пожара является готовность подразделения пожарной охраны к ведению действий по тушению пожара. Готовность подразделения пожарной охраны – динамическое явление, зависящее от многих внешних и внутренних факторов. Оценка эффективности деятельности подразделения пожарной охраны следует начинать с анализа факторов, влияющих на ее уровень. Большой вклад в разработку различных методов построения комплексного критерия оценки эффективности пожарной охраны внесли Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, Н. Н. Соболев и другие научные работники Академии ГПС МЧС России. Так, в работах [34], [35] отражен научный подход к проблеме комплексной оценки и качества функционирования пожарной охраны. Исходя из введенного в работе [286] определения понятия эффективности (качества) функционирования сложной системы, предложен общий подход к оценке эффективности деятельности пожарной охраны административно-территориальных

образований [287]. В основе его лежит математическое моделирование деятельности пожарной охраны каждого  $i$ -го региона (из рассматриваемого их множества). Деятельность характеризуется величиной показателя эффективности  $Y_i$  в зависимости от сложившихся в этом регионе условий функционирования пожарной охраны. Этот показатель описывается регрессионным уравнением вида:

$$Y_i = f(X_i) + e_i = M(Y_i) + e, (i = 1, \dots, K), \quad (6.1)$$

где  $M(Y_i) = f(X_i)$  – среднее значение показателя эффективности при фиксированном наборе значений ( $X_i$ ), которое интерпретируется как объективно обусловленный уровень эффективности ПО  $i$ -го административно-территориального образования;

$e_i = Y_i - M(Y_i)$  – значение случайной составляющей, которая объясняется разнообразием возможных режимов функционирования ПО.

По уровню сложности оценок результатов деятельности подразделений ПО описанные выше методики существенно отличаются друг от друга. К наиболее простым можно отнести методики оценки деятельности добровольной ПО, аппарата государственного пожарного надзора, ПЧ по охране населенных пунктов и ПЧ технической службы. Деятельность пожарных подразделений в этих методиках оценивается в основном линейными формулами, балльными и экспертными системами. К сложным можно отнести методику оценки деятельности инженерно-инспекторского состава объектовых ПЧ и расчет эффективности деятельности ПО регионов по предупреждению пожаров. В данных методиках в качестве метода оценки параметров был выбран регрессионный анализ, который обеспечил вычисление наилучших линейных оценок параметров модели.

Анализ разработанных методик для ППО показывает их пригодность для определения эффективности ее деятельности, однако в основном эти методики носят узкоспециальный характер. Основными научными методами, которые использовались при построении комплексной оценки деятельности, являлись многомерный статистический анализ и экспертный метод. Недостаточно проработана система первичных показателей. Особенно это касается области административно-хозяйственной и ресурсной деятельности пожарной охраны. Что касается математического аппарата

оценки деятельности, необходимо перейти от достаточно простых и тривиальных формул по сверткам к более сложной свертке показателей в комплексную оценку.

Рассматривая функционирование системы обеспечения пожарной безопасности, представляющей собой совокупность сил и средств, а также мер правового, организационного, экономического, социального и научно-технического характера [36], направленных на борьбу с пожарами, в частности, подразделений ПО разного вида, как ее подсистем, необходимо оценить ее эффективность и выполнение поставленных перед ней целей и задач с позиции оценки результативности работы этих подсистем по обеспечению пожарной безопасности.

В работе [288] авторы считают, что исследование необходимо проводить на основе методологии системного анализа с использованием статистических данных о пожарах и их последствиях, деятельности и ресурсной оснащенности ППО. Применительно к поставленной выше задаче этапность ее решения с позиции системного анализа выглядит следующим образом:

1) построение структуры исследуемой системы. Общее ее структурное построение можно определить двумя основными блоками: ресурсный потенциал и деятельность ППО. В свою очередь, каждый из рассмотренных блоков можно декомпозировать на составляющие по деятельности подразделения пожарной охраны (надзорно-профилактическая и оперативно-тактическая) или по ресурсному обеспечению подразделения пожарной охраны (технические ресурсы, объекты, трудовые ресурсы, организация пожарной охраны). Самый нижний уровень декомпозиции представляют показатели, формируемые на базе статистической отчетности;

2) определение набора базовых показателей, характеризующих структурное построение системы и ее поведение во времени, описывающих рассмотренные выше направления деятельности и ресурсную обеспеченность ППО [289];

3) анализ возможных типов состояния и поведения системы на основе информации о ней, в частности, на основе имеющихся статистических данных, то есть построение дерева свертки показателей в обобщающие оценки;

4) разработка на основе проведенного анализа модельных представлений о

системе и характере ее поведения (в частности, с применением методов математического моделирования), позволяющих проследить параметры функционирования как части, так и всей системы в целом;

5) проведение исследований с применением модели системы, то есть апробация разработанной методики на конкретном примере в целях определения ее пригодности для оценки деятельности органов управления и подразделений ПО;

6) формирование выводов по результатам исследований для выработки системы управляющих решений, направленных на разработки новых и совершенствование существующих форм деятельности органов управления и ППО.

Обзор литературных источников, посвященных проблеме оценки деятельности подразделений пожарной охраны, показал, что существующие методики носят узкоспециальный характер. Основными научными методами, которые используются для комплексной оценки деятельности, являются многомерный статистический анализ и экспертный метод.

По мнению специалистов ВНИИПО МЧС России, оценку эффективности системы обеспечения пожарной безопасности и выполнение поставленных перед ней целей и задач необходимо проводить с позиции результативности работы по обеспечению пожарной безопасности на основе методов иерархической свертки наборов показателей (статистических данных по пожарам и их последствиям, деятельности и ресурсной оснащенности ППО) в обобщающие индексы [290].

В настоящее время существует методика оценки эффективности деятельности оперативных ППО ФПС МЧС России [37]. Эта комплексная методика оценки оперативных показателей ППО позволяет выполнить анализ боевой готовности подразделения и возможности выполнять поставленную задачу в самых критических условиях. Кроме этого, методика позволяет расчетным путем определить возможные границы разброса уровней оперативных показателей конкретного подразделения в разные интервалы времени.

Однако рассмотренные методики не позволяют в полной мере решить задачу, стоящую перед настоящим исследованием в части комплексной методики оценки уровня готовности подразделения пожарной охраны к тушению пожаров. Следует

обратить внимание на некоторые обстоятельства, не нашедшие отражения при моделировании деятельности оперативных ППО. Одним из таких обстоятельств явилось расширение функций ПО в связи с вхождением Государственной противопожарной службы в МЧС России, которое предусматривало реагирование и на ликвидацию последствий ЧС, не связанных с пожарами, что может приводить к невозможности своевременного реагирования на каждое сообщение о пожаре за счет недостатка людских и технических ресурсов [38]. В связи с этим целесообразным представляется организацию деятельности ППО предусматривать не только по усредненным, но и по пиковым значениям вызовов и их максимально возможному масштабу. При этом пиковый режим необходимо рассматривать как основу стоимостной модели, определяя затраты на содержание техники и обслуживание вызовов, а также стоимость реагирования на «рядовые» события и ожидания вызова. Следует разделять стоимость ожидания на социальный и материальный компоненты. Оперативная деятельность ППО должна рассматриваться с учетом наличия и работоспособности систем противопожарной защиты объектов.

Для развития и совершенствования имеющихся моделей функционирования ППО следует продолжить исследования с учетом результатов анализа статистической информации, содержащейся в Федеральном банке данных по боевой работе, заболеваемости, смертности и травматизме пожарных [165]. Эти данные свидетельствуют об опасности деятельности пожарных, которая приводит к появлению профессиональных заболеваний, что подтверждается фактами гибели и травматизма при тушении пожаров и клиническими исследованиями. Вероятность ежегодной гибели пожарного при пожаре в целом по России составляет  $1,23 \cdot 10^{-4}$  (примерно 12 человек на 100 тыс. пожарных), вероятность травмирования –  $4,2 \cdot 10^{-3}$  (примерно 40 человек на 10 тыс. пожарных), вероятность заболеваний –  $4,34 \cdot 10^{-1}$  (примерно 43 человека на 100 тыс. пожарных) [166].

Для ранжирования приоритетов по повышению уровня готовности следует ввести понятие возможности отказа ППО. Под отказом следует понимать совокупность факторов, воздействие которых на ППО может привести к невозможности

выполнения им своих функций. Отказ ППО – стечение обстоятельств в деятельности подразделения, которые ведут к невозможности выполнения или неполному выполнению основной задачи по спасению людей и имущества, локализации и ликвидации пожара. Отказ ППО есть не что иное, как сочетание вероятности двух событий: возможность воздействия фактора отказа и возможность действия фактора отказа на конкретное подразделение. Учет этого фактора может быть осуществлен в разработанной с участием автора методике оценки уровня готовности подразделения пожарной охраны к действиям по тушению пожаров [167].

Система оценки критериев для методики анализа готовности пожарных подразделений изложена в таблицах 6.1–6.3.

Таблица 6.1 – Критерии, характеризующие оперативность реагирования подразделения и способность его к выполнению действий по тушению пожара

№ п/п	Критерий сравнения	Возможная оценка	Условия выполнения		Коэффициент значимости
1.1	Отношение (%) объектов предприятия, на которых ведомственное подразделение в состоянии справиться с Л1 и Л2, к первым 10 минутам развития пожара (с учетом времени обнаружения и сообщения)	5	0–10%	$K_{1.1} = \frac{N_{уо}}{N_{общ}} \cdot 100\%$ где $K_{1.1}$ – критерий, определяющий процентное отношение объектов предприятия, на которых ведомственное подразделение в состоянии справиться с Л1 и Л2 к первым 10 минутам развития пожара (с учетом времени обнаружения и сообщения); $N_{уо}$ – количество условно полностью охраняемых объектов подведомственной территории; $N_{общ}$ – общее количество объектов на охраняемой территории	2,5
		4	11–30%		
		3	31–50%		
		2	51–70%		
		1	71–90%		
		0	91–100%		
1.2	Временные критерии, которые могут быть оценены как выполнение нормативов в определенных упражнениях	5	Если получено 90% и более положительных оценок, из них более половины – «отлично»		2,5
		4	Если получено 80–89% положительных оценок, из них более половины хороших и отличных		
		3	Если получено 80–89% положительных оценок, из них более половины хороших и отличных		



№ п/п	Критерий сравнения	Возможная оценка	Условия выполнения		Коэффициент значимости
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям		
1.3	Масштабы пожара, который самостоятельно может быть ликвидирован подразделением	5	12	} Кол-во основных ПА, шт.	2
		4	8		
		3	4		
		2	2		
1.4	Время после прибытия в подразделение и готовности к следующему выезду	3	Подразделением произведен полный объем работ ТО за установленный промежуток времени (10 минут)		2,5
		0	Подразделением не в полном объеме выполнены работы ТО, либо время выполнения работ более 10 минут		
1.5	Укомплектованность подразделения личным составом, порядок несения дежурства, обеспеченность средствами связи и оповещения	От 0 до 5 баллов	<p>Возможные оценки и критерии их выставления более подробно описаны в пояснительной записке.</p> $K_{1.5} = (K_{OC} + K_{ЛС} + K_{СС})/2.6,$ <p>где <math>K_{OC}</math> – оценка подразделения, полученная по результатам проверки организации несения службы;</p> <p><math>K_{ЛС}</math> – оценка, отражающая укомплектованность подразделений личным составом;</p> <p><math>K_{СС}</math> – оценка, отражающая оснащенность подразделения средствами связи и оповещения;</p>		2,5
1.6	Наличие и применение звеньев ГДЗС	5	Отделения газодымозащитной службы имеются, и организация их деятельности соответствует предъявляемым требованиям		2,5
		3	Отделения газодымозащитной службы имеются, но организация их деятельности имеет до трех (включительно) незначительных отклонений от предъявляемых требований		
		2	Выставляется подразделению в том случае, если отделения газодымозащитной службы имеются, но нет соответствия вышеперечисленным требованиям		
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не соответствует вышеперечисленным требованиям		
1.7	Среднее время локализации и ликвидации пожара	5	Значение среднего времени локализации и ликвидации пожара не превышает среднероссийский и региональные показатели		2,5

№ п/п	Критерий сравнения	Возможная оценка	Условия выполнения	Коэффициент значимости
		3	Значение среднего времени локализации и ликвидации пожара превышает среднероссийский и региональные показатели, но не более чем на 10%	
		2	То же, но не более чем на 20%	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не соответствует вышеперечисленным требованиям	
1.8	Знание сотрудниками и работниками их действий в случае обнаружения пожара	5	Если получено 90% и более положительных оценок, из них более половины – «отлично»;	2
		4	Если получено 80–89% положительных оценок, из них более половины хороших и отличных	
		3	Если получено 70% положительных оценок	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям	

Таблица 6.2 – Критерии, определяющие общий уровень организации деятельности подразделения

№ п/п	Критерий сравнения	Возможная оценка	Условия выполнения	Коэффициент значимости	
2.1	Изучение и анализ действий по тушению пожаров, в которых подразделение и личный состав принимали участие	5	Эта оценка может выставляться на основе единогласного коллегиального решения по пятибалльной шкале. Для выставления этой оценки необходимо решение минимум трех человек, которые имеют опыт работ по тушению пожаров и, по возможности, представляющие разные подразделения пожарной охраны. При выставлении оценки так же целесообразно пользоваться материалами, составленными по «Методическим рекомендациям по изучению пожаров» от 19.07.2005	2	
		4			
		3			
		2			
		1			
2.2	Соблюдение правил эксплуатации и хранения СИЗОД	5	Все требования правил эксплуатации и хранения СИЗОД, предъявляемые Наставлениями, соблюдаются в полном объеме	2	
		4			То же, но при заполнении документов имеются недочеты (нарушены сроки, неполный объем заполнения и т.д.) не влияющие на изменение сущности предъявляемых требований
		3			То же, что и для 5 баллов, но имеется не более одного грубого нарушения
		2			То же, что и для 5 баллов, но имеется не более двух грубых нарушений
		0			выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям

№ п/п	Критерий сравнения	Возможная оценка	Условия выполнения	Коэффициент значимости
2.3	Порядок и периодичность подготовки, переподготовки и тренировки газодымозащитников	5	Все требования, предъявляемые к газодымозащитникам, Наставлениями по ГДЗС соблюдаются в полном объеме	2
		4	То же, но при заполнении документов имеются недочеты, не влияющие на подготовленность личного состава	
		3	То же, что и для 5 баллов, но имеются грубые нарушения не более чем по одному пункту требований	
		2	То же, что и для 5 баллов, но имеются грубые нарушения не более чем по двум пунктам требований	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям	
2.4	Состояние ПТВ и ПТО	5	Табельное ПТВ и ПТО находится на своих местах, а его состояние удовлетворяет требованиям нормативных документов	2
		4	То же, но при условии, что не все табельное ПТВ и ПТО находится на своих местах.	
		3	То же, что и для 5 баллов, но состояние ПТВ и ПТО не удовлетворяет требованиям, но не более чем по двум пунктам, либо не все табельное ПТВ и ПТО находится на своих местах, а его состояние не удовлетворяет требованиям, но не более чем по одному пункту	
		2	То же, что и для 5 баллов, но состояние ПТВ и ПТО не удовлетворяет требованиям, но не более чем по трем пунктам, либо не все табельное ПТВ и ПТО находится на своих местах, а его состояние не удовлетворяет требованиям, но не более чем по двум пунктам	
		1	То же, что и для 5 баллов, но состояние ПТВ и ПТО не удовлетворяет требованиям, но не более чем по пяти пунктам, либо не все табельное ПТВ и ПТО находится на своих местах, а его состояние не удовлетворяет требованиям, но не более чем по трем пунктам	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям	

№ п/п	Критерий сравнения	Возможная оценка	Условия выполнения	Коэффициент значимости
2.5	Количество резервной техники, количественный и качественный состав техники.	5	Выставляется подразделению в том случае, если количественный и качественный состав пожарной техники соответствует требованиям, имеются и выполняются в полном объеме планы по прохождению планового ТОиР всей техники подразделения, резервная пожарная техника законсервирована согласно требованиям	2
		4	Выставляется подразделению в том случае, если количественный и качественный состав пожарной техники соответствует требованиям, имеются и выполняются в полном объеме планы по прохождению планового ТОиР не всей техники подразделения (по объективным причинам), резервная пожарная техника законсервирована согласно требованиям	
		2	Выставляется подразделению в том случае, если количественный состав пожарной техники не соответствует требованиям (при условии укомплектованности техникой более 80%), имеются и выполняются в полном объеме планы по прохождению планового ТОиР не всей техники подразделения (по объективным причинам), резервная пожарная техника законсервирована согласно требованиям	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям	
2.6	Наличие в подразделении нормативной документации, регламентирующей его деятельность	5	Если в подразделении имеется в полном объеме и ведется в соответствующем порядке вся нормативная документация	2
		4	Если в подразделении имеется в полном объеме и ведется в соответствующем порядке (при наличии незначительных отклонений) вся нормативная документация	
		3	Если в подразделении имеется в полном объеме и ведется в соответствующем порядке вся нормативная документация (за исключением не более чем одного пункта перечня)	
		1	Если в подразделении имеется в полном объеме и ведется в соответствующем порядке вся нормативная документация (за исключением не более чем двух пунктов перечня)	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям	

№ п/п	Критерий сравнения	Возможная оценка	Условия выполнения	Коэффициент значимости
2.7	Внедрение передового опыта подразделений и разработка мероприятий, направленных на повышение эффективности и улучшение условий службы	5	Выставляется подразделению в том случае, если все входящие документы касательно данного направления деятельности, отработаны полностью, все выявленные ранее недостатки устранены в полном объеме, в подразделении ведется самостоятельная деятельность по повышению эффективности и улучшению деятельности	2
		3	Выставляется подразделению в том случае, если все входящие документы касательно данного направления деятельности отработаны не полностью (на 90% и менее), все выявленные ранее недостатки устранены в полном объеме, в подразделении ведется самостоятельная деятельность по повышению эффективности и улучшению деятельности	
		1	Выставляется подразделению в том случае, если все входящие документы касательно данного направления деятельности отработаны не полностью (на 70% и менее), все выявленные ранее недостатки устранены в полном объеме	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям	
2.8	Выполнение временных нормативов (время обработки сообщения, надевание БОП, развертывание от ПК и т.д.)	5	Если получено 90% и более положительных оценок, из них более половины – «отлично»	2
		4	Если получено 80–89% положительных оценок, из них более половины хороших и отличных	
		3	Если получено 70–79% положительных оценок, из них более половины хороших и отличных	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям	

Таблица 6.3 – Дополнительные критерии состояния пожаротушения

№ п/п	Критерий сравнения	Возможная оценка	Условия выполнения		Коэффициент значимости
3.1	Учет и анализ факторов, способствовавших (препятствовавших) тушению	5	Если в действиях личного состава на месте пожара не установлено фактов нарушения требований регламентирующих документов, действия носили скоординированный характер и были направлены на тушение пожара наиболее целесообразным при складывающейся обстановке, способом		1
		4	При соблюдении предыдущих требований, но если действия личного состава не предусматривали самого рационального использования сил и средств, но пожар был успешно ликвидирован		
		2	При соблюдении предыдущих требований, но, если действия личного состава не предусматривали самого рационального использования сил и средств, и пожар был успешно ликвидирован, но процесс тушения был более растянут во временном промежутке.		
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям.		
3.2	Отношение количества объектов, на которые автоматически выезжают другие подразделения, к общему количеству объектов в районе вызова	5	100%	$K_{3.2} = 1 - \frac{N_a}{N_{\text{общ}}} \cdot 100\%$ где $N_a$ – количество объектов на охраняемой территории, на которые установлен автоматический номер вызова, предусматривающий привлечение на тушение сил и средств других подразделений, шт.; $N_{\text{общ}}$ – общее количество объектов на охраняемой территории, на которые установлен автоматический номер вызова, шт. $K_{3.2}$ – коэффициент автоматического вызова, %	1
		4	>95%		
		3	>85%		
		2	>80%		
		1	>75%		
		0	>70%		

№ п/п	Критерий сравнения	Возможная оценка	Условия выполнения	Коэффициент значимости
3.3	Участие в проведении пожарно-тактических учений	3	Если все планы пожаротушения, составленные в этом подразделении, отработаны полностью, не имеется грубых замечаний со стороны вышестоящих лиц на качество и полноту их проведения	1
		2	Если не все планы пожаротушения, составленные в этом подразделении, отработаны полностью (но более 85%), не имеется грубых замечаний со стороны вышестоящих лиц на качество и полноту их проведения	
		1	Если не все планы пожаротушения, составленные в этом подразделении, отработаны полностью (но более 75%) и не имеется грубых замечаний со стороны вышестоящих лиц на качество и полноту их проведения либо при проведении нарушений были выявлены грубые нарушения нормативных документов (три и более нарушения)	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям	
3.4	Наличие и уровень взаимодействия между администрацией объекта, руководством подразделения и органами ФПС МЧС в области обеспечения ПБ на объекте (корректировка и отработка планов, своевременное сообщение об изменении обстановки на объекте)	5	Не было выявлено грубых нарушений требований нормативных документов, все изменения, внесенные в технологические процессы предприятия, были переоценены и с точки зрения пожарной безопасности в должностных инструкциях и планах пожаротушения, регулярно и качественно проводятся пожарно-тактические учения, налажено взаимодействие с другими видами пожарной охраны и оперативными службами	1
		3	Не было выявлено грубых нарушений требований нормативных документов, все изменения, внесенные в технологические процессы предприятия, были переоценены и с точки зрения пожарной безопасности в должностных инструкциях и планах пожаротушения, проводятся пожарно-тактические учения	
		1	Не было выявлено грубых нарушений требований нормативных документов, не все изменения, внесенные в технологические процессы предприятия, были переоценены и с точки зрения пожарной безопасности в должностных инструкциях и планах пожаротушения, проводятся пожарно-тактические учения	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям	

№ п/п	Критерий сравнения	Возможная оценка	Условия выполнения	Коэффициент значимости
3.5	Наличие в подразделении документов, предписывающих выполнение правил пожарной безопасности на объекте с учетом его специфики	5	Если разработаны все должностные инструкции, которые отражают все требования пожарной безопасности в том числе и те, что обусловлены специфичностью деятельности конкретного объекта, инструкции утверждены и корректируются соответствующим образом	1
		3	Если разработаны все должностные инструкции, которые отражают требования пожарной безопасности в том числе и те, что обусловлены специфичностью деятельности конкретного объекта, инструкции утверждены и корректируются соответствующим образом	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям	
3.6	Количество полученных подразделением замечаний от контролирующих органов (ФПС)	3	Если в ходе мероприятий по контролю не было выявлено грубых отступлений от норм регламентирующих документов	1
		2	Если в ходе мероприятий по контролю были выявлены грубые отступлений от норм регламентирующих документов, но не более чем по одному пункту	
		1	Если в ходе мероприятий по контролю были выявлены грубые отступлений от норм регламентирующих документов, но не более чем по двум пунктам	
		0	Выставляется подразделению в том случае, если оно не удовлетворяет вышеперечисленным требованиям	

Методика позволяет оценить по различным критериям степень готовности подразделения: «не готово», «ограниченно готово», «готово». После определения уровня готовности ППО к выполнению задач по тушению пожаров и в зависимости от его результатов следует приступать к определению необходимого количества СЧС ПО, привлекаемых на тушение пожара на объекте энергетики.

## **6.2 Методика оценки достаточности сил и средств для локализации пожаров в зданиях объектов энергетики**

Методика оценки достаточности СЧС для обеспечения тушения пожара в зданиях объектов энергетики основывается на сопоставлении привлечения и задействования имеющихся СЧС пожарной охраны с развитием возможного пожара.



Определение динамики пожара при подаче ОТВ производится с учетом скорости тушения пожара на рассматриваемых объектах, которые получены из статистических данных.

Привлечение СиС подбирается исходя из своевременности их сосредоточения при условии выполнения цели выезда дежурного караула на пожар, определяемой в соответствии с СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения» [30].

Модели развития возможных пожаров принимаются из вариантов, предусмотренных в плане пожаротушения. Для объектов энергетики, на которые не разрабатываются планы пожаротушения, производится моделирование статистически наиболее вероятного пожара при помощи общепринятой расчетной схемы свободного развития пожара и его тушения в соответствии с СП 232.1311500.2015 «Пожарная охрана предприятий. Общие требования» [32].

Расчетные методики, составляющие метод, усовершенствованы и расширены по сравнению со ставшей классической расчетной схемой пожарной тактики.

Так взамен принципа двукратного уменьшения скорости распространения горения после введения первого ствола на тушение, вне зависимости от площади пожара, вводится расчет снижения скорости распространения пожара при введении каждого ствола. В новой методике предложен безразмерный коэффициент тушения пожара, физический смысл которого выражается в степени охвата фронта пожара, фронтом тушения стволов, и может быть записан в виде:

$$K_{\text{туш}} = \left(1 - \frac{\Phi_{\text{туш}}}{\Phi_{\text{пож}}}\right), \quad (6.2)$$

где  $\Phi_{\text{туш}}$  – фронт тушения пожара поданных стволов;

$\Phi_{\text{пож}}$  – фронт пожара.

Коэффициент  $K_{\text{туш}}$  в случае отрицательного значения приравнивается к нулю.

Определить фронт тушения одним стволом можно исходя из расходных характеристик ствола, глубины протушивания и требуемой интенсивности. Таким образом, значение фронта тушения одним стволом можно определить в зависимости вида:

$$\Phi_{\text{туш.ств}} = \frac{q_{\text{ств}}}{I_{\text{тр}} \cdot \square}, \quad (6.3)$$

где  $q_{\text{ств}}$  – расход ствола;

$I_{\text{тр}}$  – требуемая интенсивность подачи ОТВ;

$h$  – глубина тушения ствола.

Исходя из того, что на участке, где введен ствол, обеспечивается подача нормативной интенсивности ОТВ, можно предположить, что развитие пожара на данном участке невозможно. Тогда линейная скорость развития после ведения ствола составит:

$$V'_л = K_{\text{туш}} \cdot V_л, \quad (6.4)$$

где  $V_л$  – справочное значение линейной скорости распространения пламени на данном виде объекта либо по известному горючему материалу, м/мин.

В предлагаемой методике расчета динамики площади пожара также учитываются вынужденные перерывы в подаче ОТВ, связанные с недостатком ОТВ, либо сменной звеньев ГДЗС для восстановления ресурса СИЗОД. Кроме этого, наряду с расчетом подачи ОТВ ручными водяными и пенными стволами поверхностным способом методика позволяет рассчитывать применение объемного способа пожаротушения различными ОТВ от мобильных средств пожаротушения (воздушно-механическая пена, газовые составы). При этом снижение скорости распространения пожара предлагается рассчитывать не только снижая линейную скорость распространения пожара, но и учитывая скорость тушения пожара, вычитая ее из имеющейся площади пожара в единицу времени. Скорость тушения определяется для помещения пожара или вида объекта пожара выборкой и последующей обработкой соответствующих статистических данных.

Таким образом, в дополнение к классическому тактическому расчету, ставящему своей целью определение временных параметров локализации пожара, производится расчет времени тушения до момента ликвидации открытого горения и его верификация со статистическими данными. Это позволяет рассчитать время задерживания СиС на пожаре и определить на этапе предварительного планирования необходимость привлечения дополнительных СиС.

Введение в методику расчета скорости тушения пожара позволяет осуществить построение расчетной схемы полного цикла тушения пожара с момента подачи первого ствола до ликвидации открытого горения с учетом перерывов в по-

даче ОТВ, вызванных недостатком противопожарного водоснабжения, повреждением насосно-рукавных систем или отказом пожарной техники, либо сменой звеньев ГДЗС для восстановления ресурса СИЗОД.

Методика имеет следующие допущения:

1) скорость тушения для всех видов стволов (ручных и лафетных) принимается одинаковой, основываясь на соображении, что большая площадь тушения лафетного ствола по сравнению с ручным нивелируется с пропорционально большими затратами времени на смену позиции;

2) показатель площадной скорости тушения одним стволом рассчитывается как отношение площади пожара к разнице во времени от подачи ОТВ до ликвидации открытого горения и числу задействованных стволов. При этом учитываются как стволы на тушение, так и на защиту. Поэтому в показателе учтены все стволы, причем стволы на защиту подаются в случаях, когда не представляется возможным осуществить тушение по площади пожара и образуются участки над и под зоной пожара и по сторонам от нее, ограниченные строительными конструкциями, которые и охлаждаются при пожаре при помощи стволов, вводимых на защиту. Это позволяет использовать показатель площадной скорости тушения одним стволом без разделения на стволы на тушение и защиту, таким образом, расчет уменьшения площади пожара при введении стволов на аналогичных объектах может быть осуществлен в целом, по площади пожара;

3) в модели развития и тушения пожара предусмотрен показатель скорости тушения, зависящий от воздействия, подаваемого ОТВ, как средства, препятствующего распространению пламени, приводя к замедлению распространения пожара.

4) Из выражений (6.2) и (6.4) можно определить время локализации пожара:

– при  $K_{\text{туш}} = 0$ ,  $V_{\text{л}} = 0$ ;

– при выполнении условия бесперебойной подачи ОТВ (достаточно звеньев ГДЗС для непрерывной работы стволов, пример расчета показан в параграфе 2.2).

Скорость тушения площади пожара может быть рассчитана по формуле:

$$V_s^{\text{туш}} = a \cdot V_{\text{л}}^{\text{туш}} \quad (6.5)$$

или выражена через удельный расход

$$V_s^{\text{туш}} = \frac{Q_B}{q_{\text{уд}}}, \quad (6.6)$$

где  $a$  – длина фронта пожара, м;

$Q_B$  – расход воды, л/мин.;

$q_{\text{уд}}$  – удельный расход воды, требуемый для тушения, л/м<sup>2</sup>

В связи с тем, что вектор скорости тушения пожара ( $V_s^{\text{туш}}$ ;  $V_l^{\text{туш}}$ ) направлен прямо противоположно скорости распространения пожара ( $V_s$ ,  $V_l$ ), процесс развития пожара при тушении будет происходить с результирующей скоростью, равной разности векторов скоростей распространения и тушения пожара. Поэтому пожар (фронт пламени) с момента  $t_1$  будет распространяться с меньшими значениями  $V_s$  и  $V_l$ , соответственно равными:

$$\bar{V}_s^{\text{рез}} = V_s - V_s^{\text{туш}}; \quad (6.7)$$

$$\bar{V}_l^{\text{рез}} = V_l - V_l^{\text{туш}}. \quad (6.8)$$

Значение скорости роста площади пожара при тушении  $V_s^{\text{рез}}$  может быть определено из уравнения (6.5), так как все входящие в него параметры известны или могут быть получены из практики тушения реальных пожаров (натурных экспериментов).

Для описания физической картины процесса развития пожара при воздействии огнетушащих средств большое значение имеет определение результирующей скорости распространения пламени, которая может быть рассчитана из следующих уравнений:

$$\bar{V}_s^{\text{рез}} = a \cdot V_l \frac{Q_B}{q_{\text{уд}}} \quad (6.9)$$

или

$$\bar{V}_s^{\text{рез}} = a \cdot \bar{V}_l^{\text{рез}}. \quad (6.10)$$

Тогда:

$$\bar{V}_l^{\text{рез}} = \frac{\bar{V}_s^{\text{рез}}}{a} = V_l - \frac{Q_B}{a \cdot q_{\text{уд}}}. \quad (6.11)$$

Нетрудно заметить, что в уравнении (6.10) второй член – это линейная скорость тушения пожара:

$$V_l^{\text{туш}} = \frac{Q_B}{a \cdot q_{\text{уд}}}. \quad (6.12)$$

Таким образом, процесс развития пожара при тушении (начиная с момента  $t_1$ ) будет происходить с меньшими скоростями ( $\bar{V}_s^{pez}$ ,  $\bar{V}_л^{pez}$ ) до тех пор, пока не будет обеспечена дополнительная подача воды с расходом  $Q_2$  в момент времени  $t_2$ .

Дополнительный расход воды  $Q_2$ , в свою очередь, приведет к торможению процесса развития пожара, который будет распространяться с новыми значениями скоростей:

$$\bar{V}_s^{pez} = \bar{V}_s^{pez} - \bar{V}_s^{myu}; \quad (6.13)$$

$$\bar{V}_л^{pez} = \bar{V}_с^{pez} - \frac{Q_2}{a \cdot q_{уд}}. \quad (6.14)$$

При этом в момент времени  $t_2$  расход воды будет равен:

$$\sum Q_B = Q_1 + Q_2 \quad (6.15)$$

и, соответственно, скорость тушения площади пожара составит:

$$\sum V_s^{туш} = \frac{Q_1 + Q_2}{q_{уд}}. \quad (6.16)$$

Отсюда, локализация пожара может наступить в случае, когда наступит момент времени (например,  $t_3$ ), когда результирующие векторы скоростей развития процесса пожара будут равны нулю:

$$\bar{V}_s^{pez} = 0; \quad (6.17)$$

$$\bar{V}_л^{pez} = 0. \quad (6.18)$$

В этот момент времени также должна быть обеспечена требуемая интенсивность подачи воды по фронту пожара на расчетную площадь тушения:

$$I_\phi = I_{тр}. \quad (6.19)$$

Под расчетной площадью тушения пожара понимается площадь, которая может быть эффективно протушена в зависимости от вида применяемых стволов:

$$S_n^p = h \cdot a, \quad (6.20)$$

где  $h$  — эффективная глубина протушивания, которая для ручных стволов принимается равной 5 м, а для лафетных — 10 м.

Расчетное значение удельного расхода можно определить по формуле:

$$q_{уд} = I_{тр} \cdot t_{туш}^p, \quad (6.21)$$

где  $t_{туш}^p$  — время тушения пожара на расчетной площади;

На основании данных по тушению реальных пожаров в таблице 6.4 приведены средние значения расчетного времени тушения в зависимости от расчетной площади тушения.

Таблица 6.4 – Средние значения расчетного времени тушения в зависимости от расчетной площади тушения

Расчетная площадь тушения $S_{\text{п}}, \text{м}^2$	Расчетное время тушения $t_{\text{туш}}^{\text{р}}, \text{мин.}$	Расчетный удельный расход воды $q_{\text{уд}}, \text{л/м}^2$
$\leq 200$	5–10	300–600
$>200 \leq 600$	10–15	600–900
$>600$	15–30	900–1500

Из схемы развития пожара нетрудно вычислить его площадь на момент его локализации:

$$S_{\text{п}}^{\text{лок}} = a \cdot V_{\text{л}} \cdot t_1 + a \cdot \bar{V}_{\text{л}}^{\text{pez}} (t_2 - t_1) + a \cdot \bar{V}_{\text{л}}^{\text{pez}} (t_3 - t_2). \quad (6.22)$$

и суммарное значение скорости тушения площади пожара:

$$\sum \bar{V}_{\text{с}}^{\text{туш}} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{q_{\text{уд}}}. \quad (6.23)$$

В связи с тем, что в момент локализации пожара изменение его границ остановлено ( $S_{\text{п}} = \text{const}$ ), начинается процесс ликвидации пожара, то есть уменьшение площади пожара.

Время тушения (ликвидации) пожара может быть рассчитано по формуле:

$$t_{\text{туш}} = \frac{S_{\text{п}}}{\sum V_{\text{с}}^{\text{туш}}} = \frac{S_{\text{п}}^{\text{лок}} \cdot q_{\text{уд}}}{Q_1 + Q_2 + Q_3}. \quad (6.24)$$

Таким образом, рассмотренная выше методика позволяет более полно описывать основные параметры пожара ( $S_{\text{п}}, V_{\text{п}}^{\text{с}}, V_{\text{туш}}^{\text{с}}, V_{\text{туш}}^{\text{п}}, V_{\text{л}}$ ) на всех фазах его развития (от начала пожара до полной его ликвидации). Аналогично могут быть решены вопросы локализации и ликвидации пожаров других схем развития (прямоугольного, двухстороннего, кругового и др.).

В данной методике об удельных расходах и интенсивностях подачи ОТВ (необходимость, достаточность и целесообразность) можно судить, используя нижеперечисленные условия.

Приведенный подход моделирует процесс развития и тушения пожара, но оперирует данными, которые нельзя получить статистически. Поэтому из банка статистических данных о пожарах в Российской Федерации за 2013–2018 годы [9]–

[12] была осуществлена выборка и последующий расчет показателя скорости тушения пожара объектов энергетики.

Расчет площадной скорости тушения пожара был произведен делением площади пожара на время открытого горения с момента введения стволов для данного пожара.

Расчет площадной скорости тушения пожара одним стволом производился делением площади пожара на время открытого горения и на общее количество приборов подачи ОТВ (стволов):

$$V_{st} = \frac{S_{п}}{T_{ог}}; \quad (6.25)$$

$$V_{st1} = \frac{S_{п}}{T_{ог} \cdot N_{ств}}, \quad (6.26)$$

где  $V_{st}$  – площадная скорость тушения пожара одним стволом, м<sup>2</sup>/мин.;

$S_{п}$  – площадь пожара, м<sup>2</sup>;

$T_{ог}$  – время открытого горения, мин.;

$N_{ств}$  – количество поданных стволов, шт.

Выборки и расчеты были произведены для основных помещений объектов энергетики, пожары в которых могут привести к остановке технологического процесса выработки энергии с последующей математической обработкой.

Результаты определения скоростей тушения одним стволом приведены на рисунках 6.4–6.11.

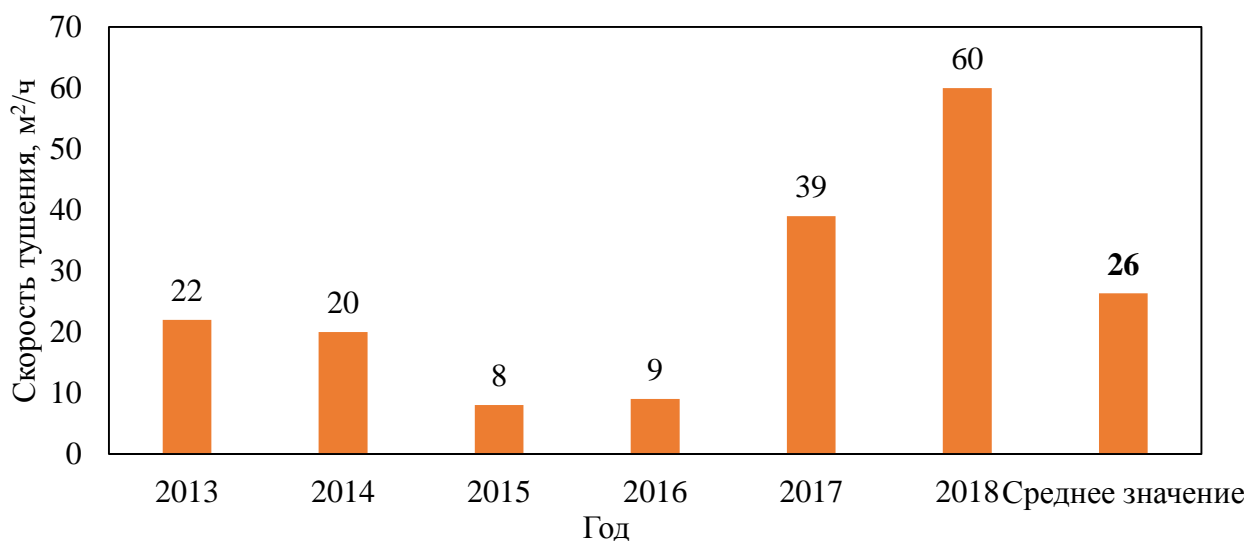


Рисунок 6.4 – Данные о скорости тушения (м<sup>2</sup>/ч) одним стволом в зданиях энергоблока тепловой или гидравлической электростанции за 2013–2018 гг.

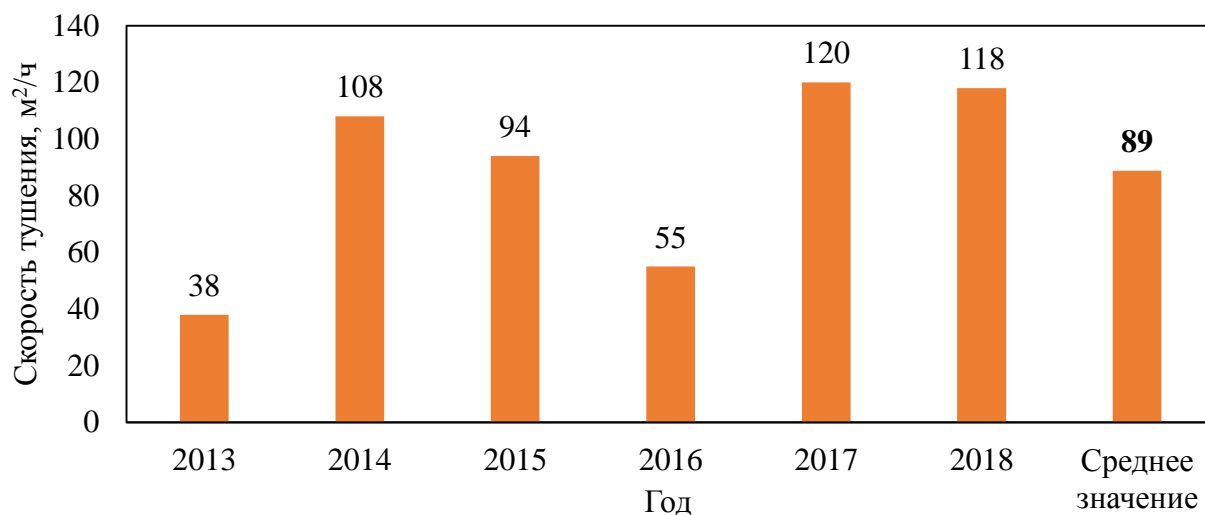


Рисунок 6.5 – Данные о скорости тушения (м²/ч) одним стволом в здании дизельной электростанции за 2013–2018 гг.

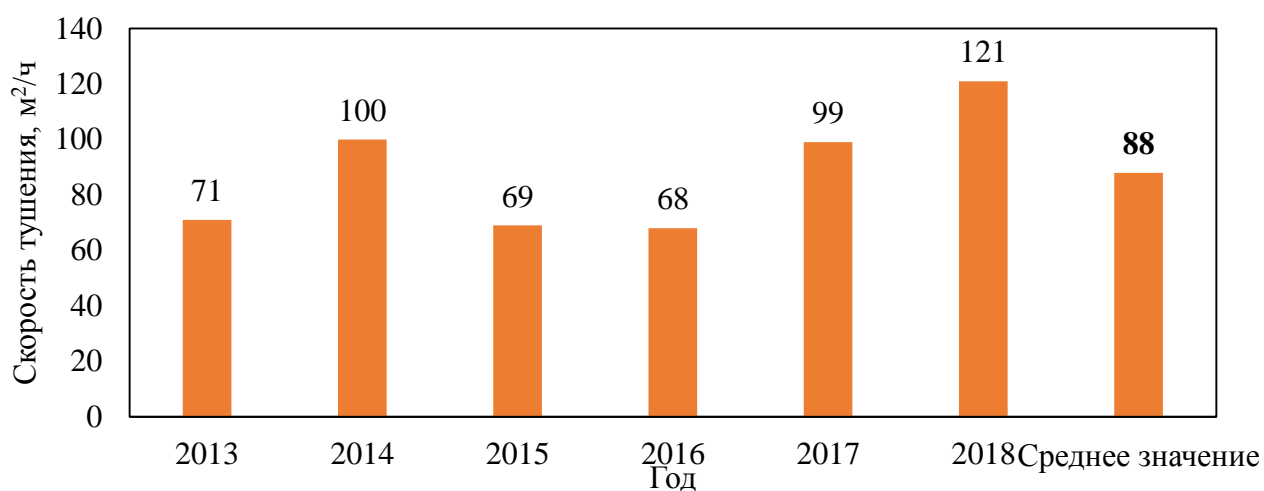


Рисунок 6.6 – Данные о скорости тушения (м²/ч) одним стволом в здании котельной за 2013–2018 гг.

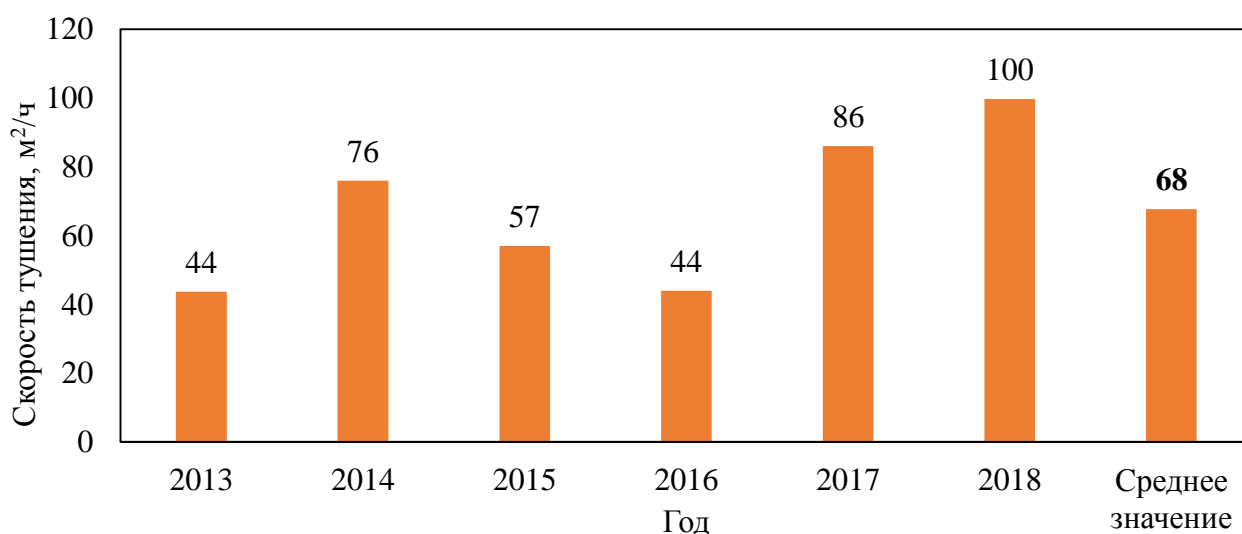


Рисунок 6.7 – Данные о скорости тушения (м²/ч) одним стволом в зданиях энергопроизводящих объектов за 2013–2018 гг.



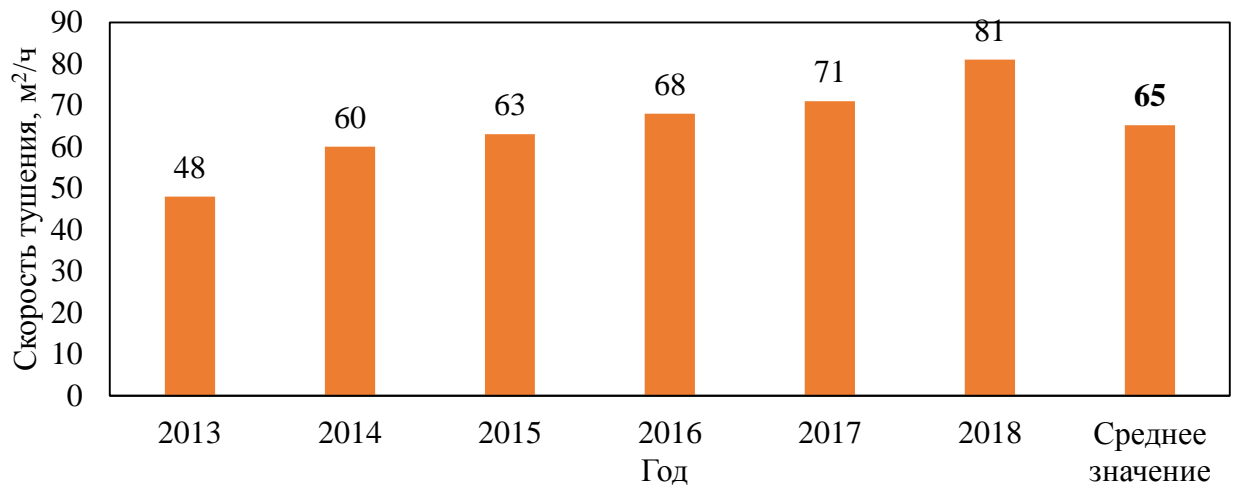


Рисунок 6.8 – Данные о скорости тушения (м²/ч) одним стволом при пожаре электротрансформаторных подстанций, трансформаторов, электродизельных установок за 2013–2018 гг.

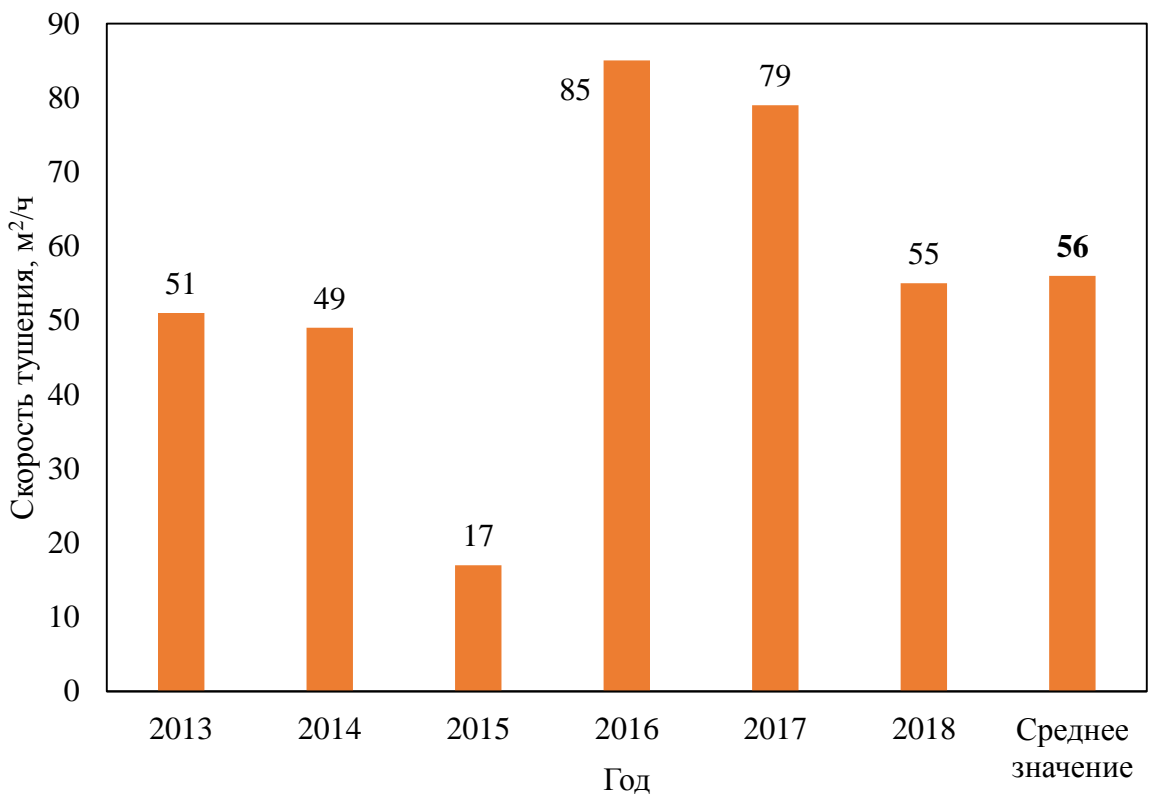


Рисунок 6.9 – Данные о скорости тушения (м²/ч) одним стволом в кабельных тоннелях, галереях за 2013–2018 гг.

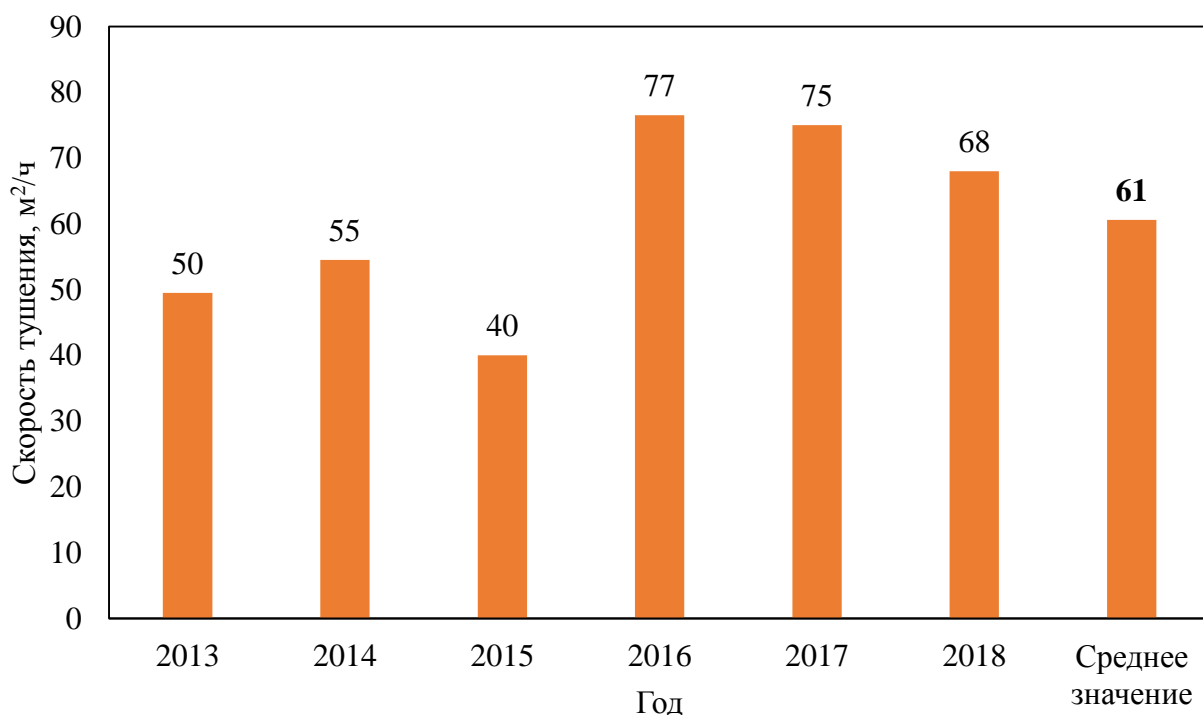


Рисунок 6.10 – Данные о скорости тушения (м²/ч) одним стволом в зданиях энерготранспортирующих объектов за 2013–2018 гг.

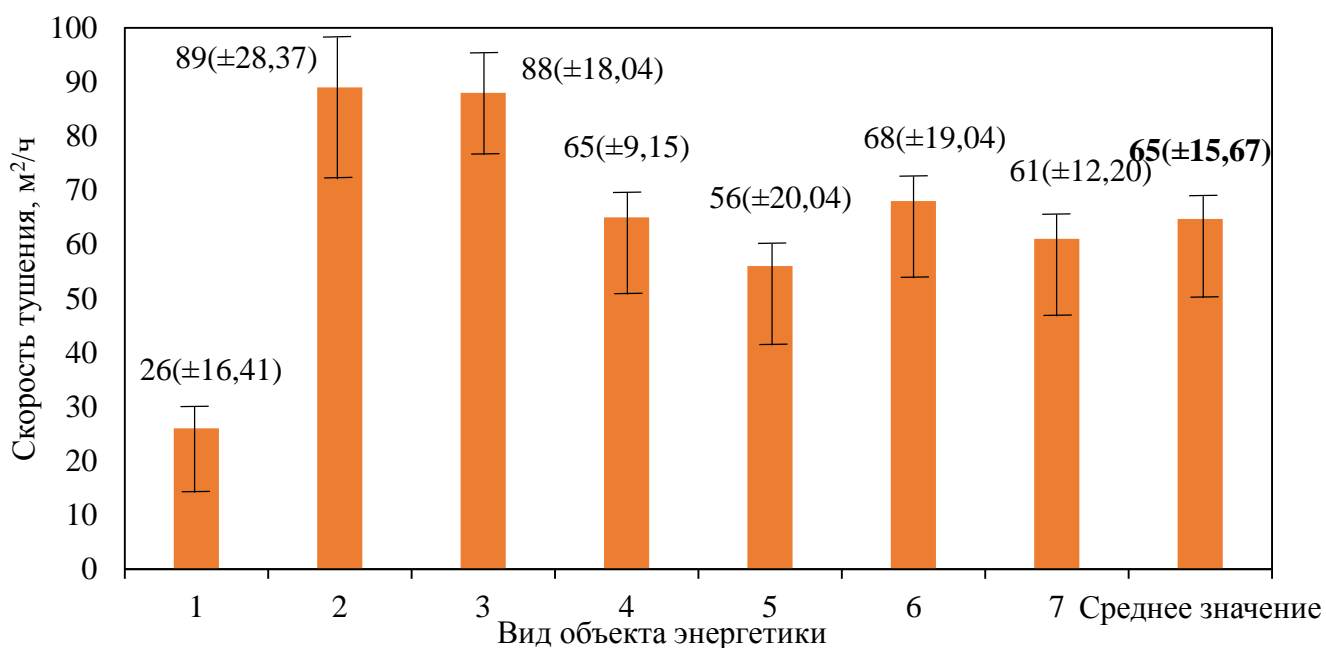


Рисунок 6.11 – Средняя скорость (м²/ч) тушения пожара одним стволом на объектах энергетики за 2013–2018 гг.: 1 – здание энергоблока тепловой или гидравлической электростанции; 2 – здание дизельной электростанции; 3 – здание котельной; 4 – электротрансформаторная подстанция, трансформатор, электродизельная установка; 5 – кабельный тоннель, галерея; 6 – здание энергопроизводящего объекта; 7 – здание энерготранспортирующего объекта

Выявлено, что более высокая скорость тушения пожаров оказалась в зданиях энергоблока тепловой или гидравлической электростанций. Это можно объяснить тем, что на эти объекты прибытие объектовых ППО происходит быстрее.

Результаты расчетов скоростей тушения пожаров по видам и помещениям объектов энергетики показывают их реалистичность, что позволяет применить полученные значения для моделирования процесса тушения пожара объекта энергетики с посредством применения методики с учетом особенностей тушения для каждого вида помещений. Порядок формирования баз данных и расчетных зависимостей для определения хода развития и тушения пожара представлен на рисунках 6.12, 6.13.

#### Исходные данные оценки достаточности СиС

для своевременного и непрерывного тушения пожара объекта энергетики:

1. План пожаротушения и расписание выезда (план привлечения):
2. Таблица сосредоточения СиС на объекте (время прибытия, вид и модель пожарной техники, численность расчета)
3. Варианты возможного развития пожара из рассмотренных в плане пожаротушения.
4. Справочные и статистические данные:
  - 4.1 Набор данных по скоростям и сложности тушения пожара на объектах энергетики
  - 4.2 Справочные данные по скоростям распространения пожара (Справочник РТП).

#### Формирование данных для модели развития и тушения пожара

Формируются данные:

1. форма помещения пожара – геометрия его распространения;
2. горючий материал или помещение – выбор скорости распространения по справочнику РТП;
3. скорость тушения одним стволом по виду горючего материала или помещению пожара и показатель сложности тушения пожара на объектах энергетики.

Рисунок 6.12 – Исходные данные оценки достаточности СиС  
для своевременного и непрерывного тушения пожара объекта энергетики

<p style="text-align: center;"><b>Площадь пожара, м<sup>2</sup></b></p> <p>Развитие пожара (рост площади) происходит сначала по круговой (полукруговой или секторальной форме) в зависимости от расположения очага.</p> <p>По достижению горением стенки форма развития принимает прямоугольную одно- или двухстороннее развитие.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Время свободного развития, мин.</b></p> <p>– принимается как сумма времен обнаружения пожара, сообщения, сбора и выезда, следования от депо до места пожара, времени развертывания;</p> <p>– скорость распространения пожара за первые 10 мин пожара принимается половинной от табличного значения по данному виду объекта пожара</p>
<p style="text-align: center;"><b>Общее количество приборов подачи ОТВ (стволов), ед.</b></p> <p>Определяется путем суммирования прибывающих тактических единиц с учетом условий введения стволов, ед.:</p> <p>Ствол в непригодной для дыхания среде – подается в составе звена ГДЗС (не менее 3 газодымозащитников и одного пожарного на посту безопасности).</p> <p>Ствол Б на открытой территории – 1 пожарный; на высоте – 2 пожарных.</p> <p>Ствол А и лафетный – 2 пожарных, на высоте – 3 пожарных.</p> <p style="text-align: center;"><b>Расход, подаваемый на тушение пожара, л/мин</b></p> <p>Пожарные стволы, поданные на тушение А – 450 л/мин, Б – 210 л/мин.; лафетный – 1200 л/мин.; пенный – 360 л/мин.; порошковый – 240 л/мин.; водопенный – 300 л/мин.; высокого давления – 120 л/мин.</p> <p>Количество стволов соответственно каждому виду стволов, после чего результаты умножения по каждому виду стволов суммируются</p>	<p style="text-align: center;"><b>Процесс тушения пожара – характер изменения площади пожара, мин</b></p> <p>Момент подачи первого ствола изменяет скорость распространения пожара на величину скорости тушения – снижения скорости распространения пожара при введении каждого ствола.</p> <p>Снижение скорости распространения пожара рассчитывается вычитанием скорости тушения каждым стволом из скорости роста площади пожара. Скорость тушения определяется для помещения пожара или вида объекта пожара выборкой и последующей обработкой соответствующих статистических данных.</p> <p>В модели учитываются вынужденные перерывы в подаче ОТВ, вызванные недостатком противопожарного водоснабжения (подвоз воды), либо сменой звеньев ГДЗС для восстановления ресурса СИЗОД (расчетное время работы звена в ДАСВ принимается 30 мин., скорость движения звена ГДЗС в задымленной зоне – 10–50 м/мин.</p>

Рисунок 6.13 – Исходные данные и зависимости  
для расчета оценки достаточности СИС

Расчет характера изменения площади пожара производится в соответствии с моделью развития пожара для соответствующей формы его развития до момента введения на тушение средств подачи ОТВ (стволов):

$$\Delta S_{\Pi} = mF_{\Pi} V_{\Pi} T; \quad (6.27)$$

$$\Delta S_{\Pi T} = V_{st1} N_{ств} T. \quad (6.28)$$

Когда  $\Delta S_{\Pi} = \Delta S_{\Pi T}$  наступит локализация.

Расчет площади пожара производится разностью произведения числа направлений распространения пожара, фронта пожара, и линейной скорости распространения горения и произведения площадной скорости тушения пожара одним стволом на число стволов за время:

$$S_{\Pi} = S_{св.р} + (\sum_{i=1}^n (mF_{\Pi} V_{\Pi}) - V_{st1} N_{ств}) T; \quad (6.29)$$

$$S_{\Pi} = \int_0^{T_{лик}} (\sum_{i=1}^n (mF_{\Pi} V_{\Pi}) - V_{st1} N_{ств}) dT. \quad (6.30)$$

На основе данной расчетной модели создана соответствующая «Программа по оценке достаточности сил и средств тушения пожара» (рисунок 6.14) [291], базовый алгоритм которой приведен на рисунке 6.15, а алгоритмы блоков программы приведены на рисунках 6.16–6.21.

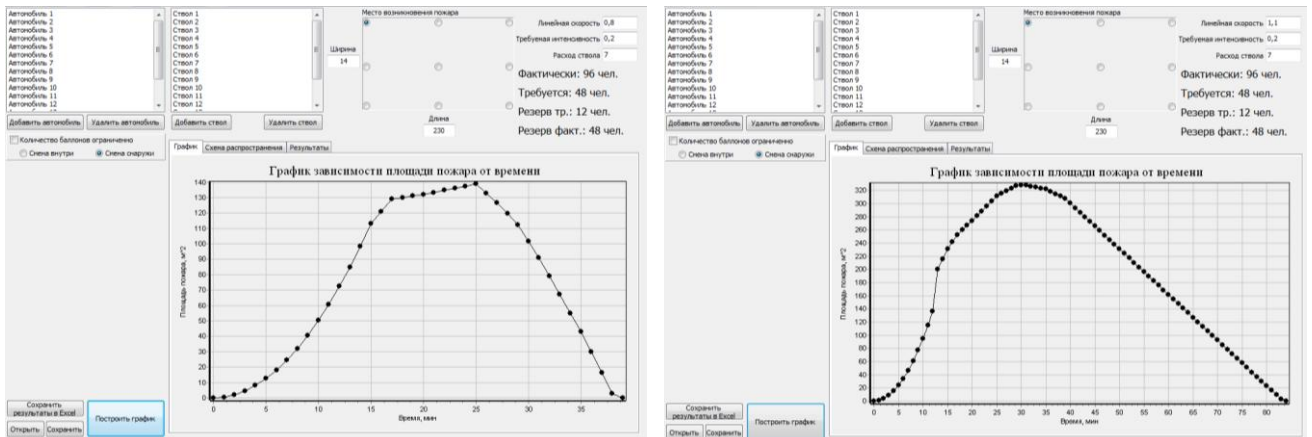


Рисунок 6.14 – Программа по оценке достаточности сил и средств тушения пожара

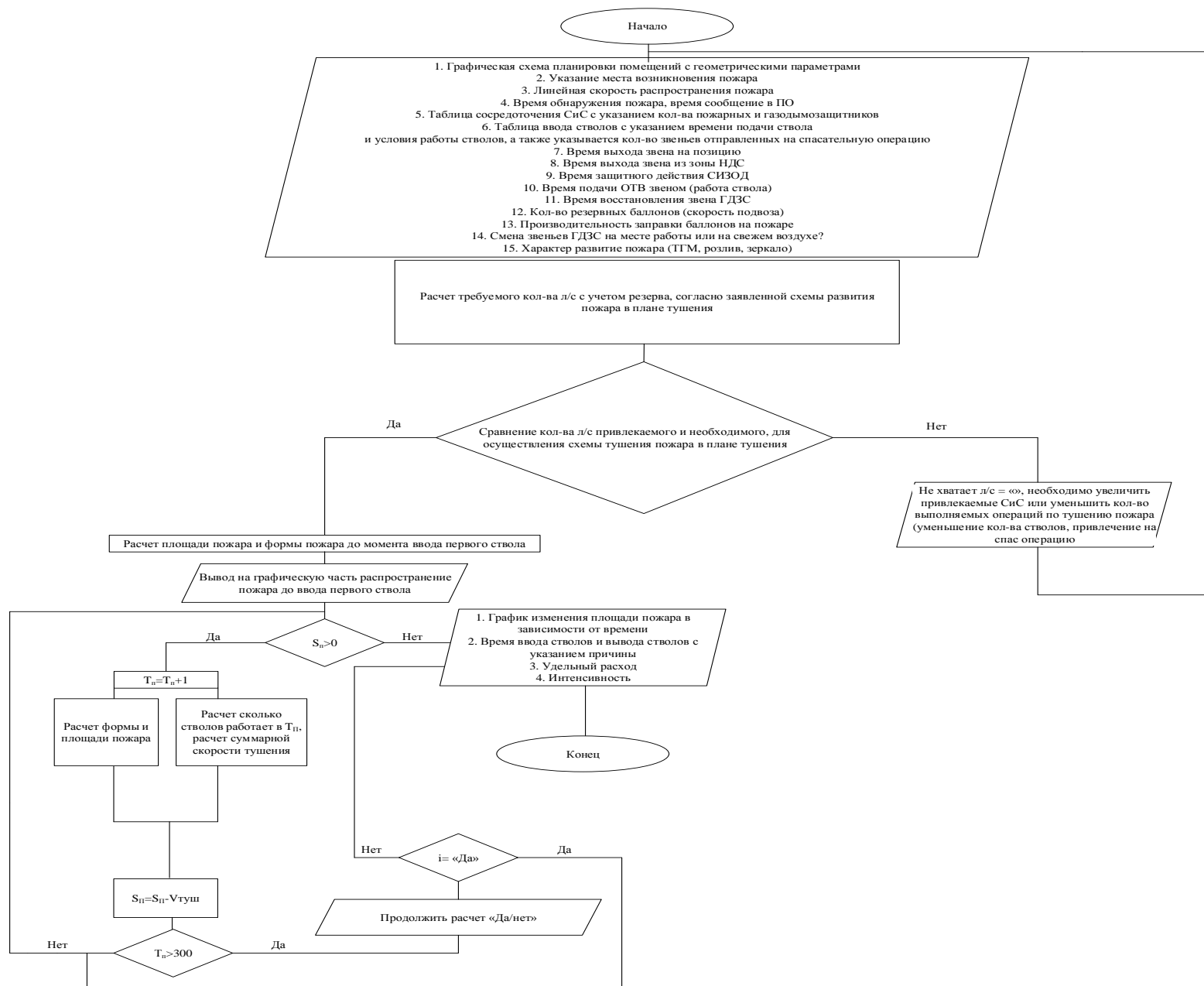


Рисунок 6.15 – Базовый алгоритм программы расчета достаточности СИС для тушения пожара объекта энергетики

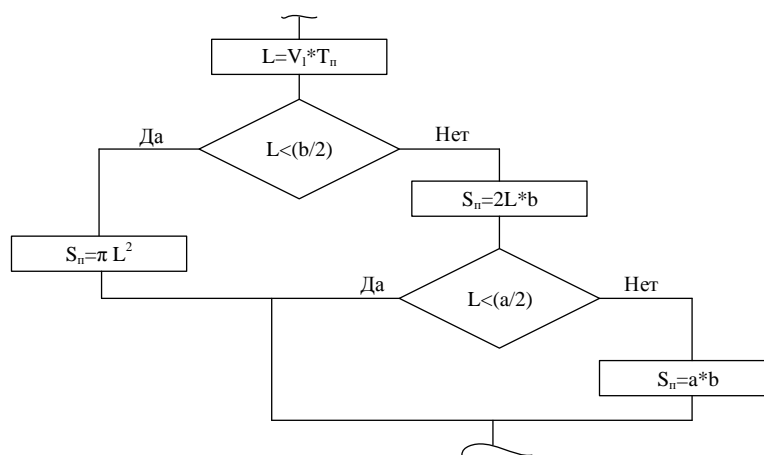


Рисунок 6.16 – Алгоритм расчета площади пожара (условие: пожар в центре помещения,  $a$  – длина,  $b$  – ширина помещения)

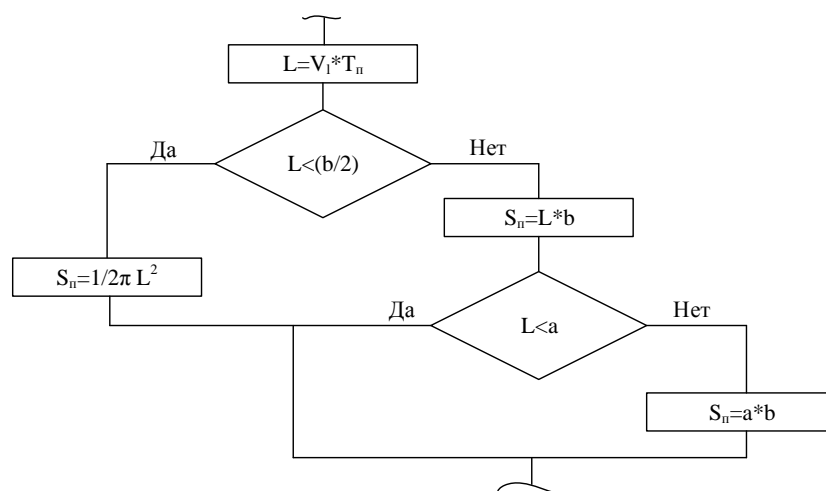


Рисунок 6.17 – Алгоритм расчета площади пожара (условие: пожар у стены в центре,  $a$  – длина,  $b$  – ширина помещения)

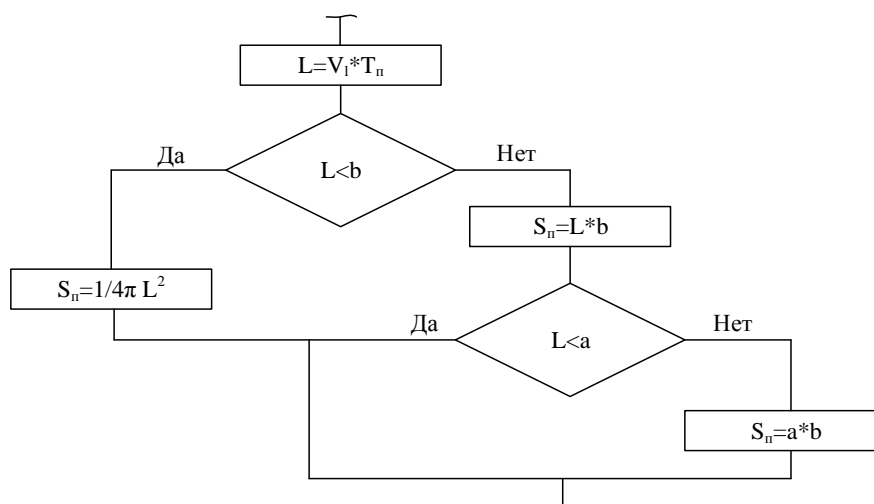


Рисунок 6.18 – Алгоритм расчета площади пожара (условие: пожар в углу помещения,  $a$  – длина,  $b$  – ширина помещения)

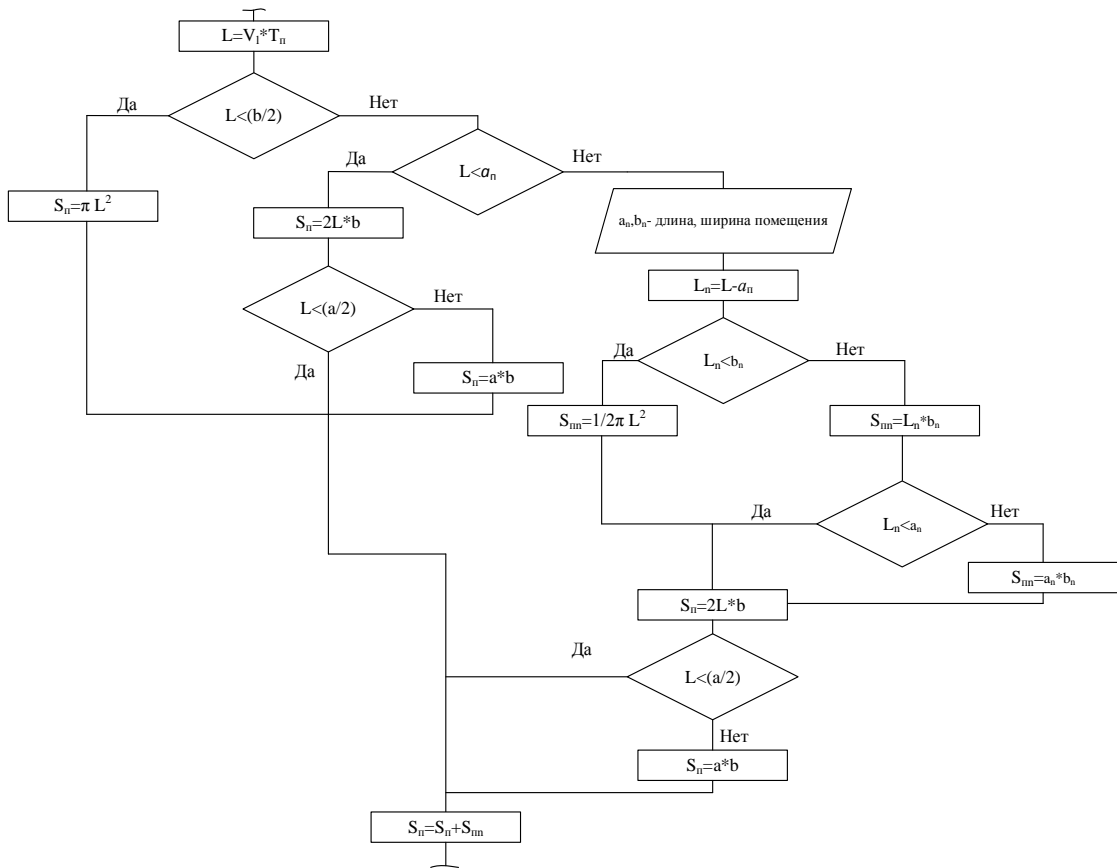


Рисунок 6.19 – Алгоритм расчета площади пожара (пожар в центре помещения, есть проемы,  $N$  – количество проемов,  $a_n$  – расстояние до середины проема от очага пожара)

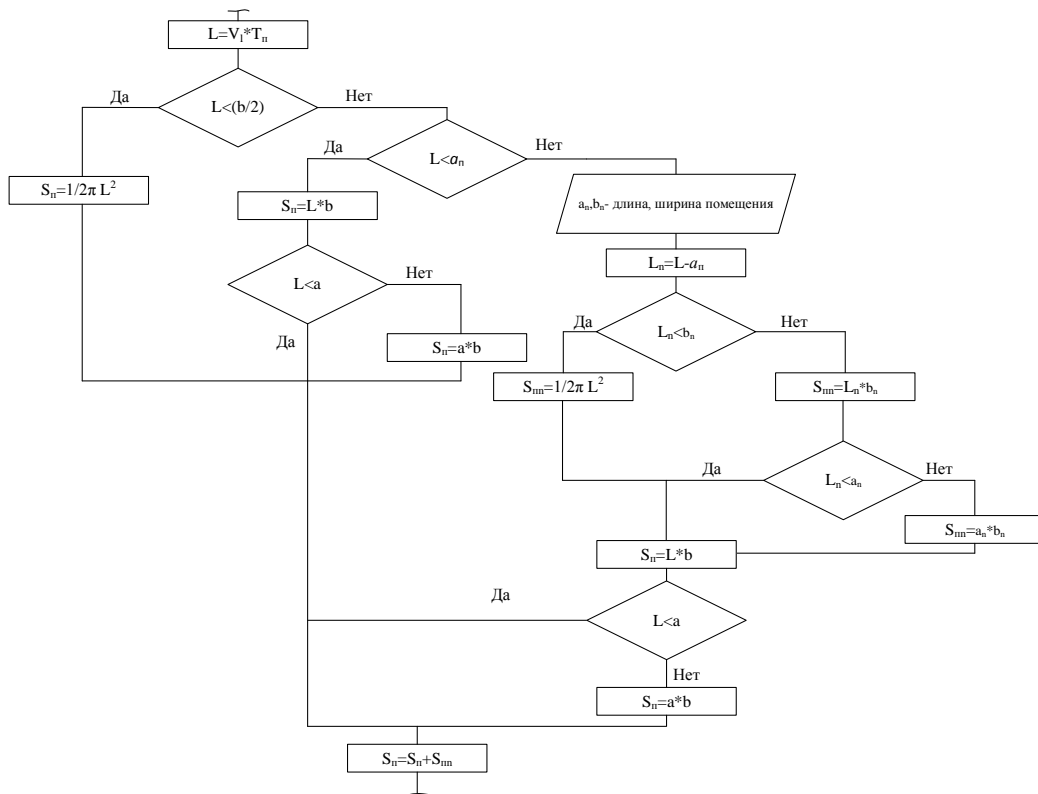


Рисунок 6.20 – Алгоритм расчета площади пожара (условие: пожар у стены в центре, есть проемы)



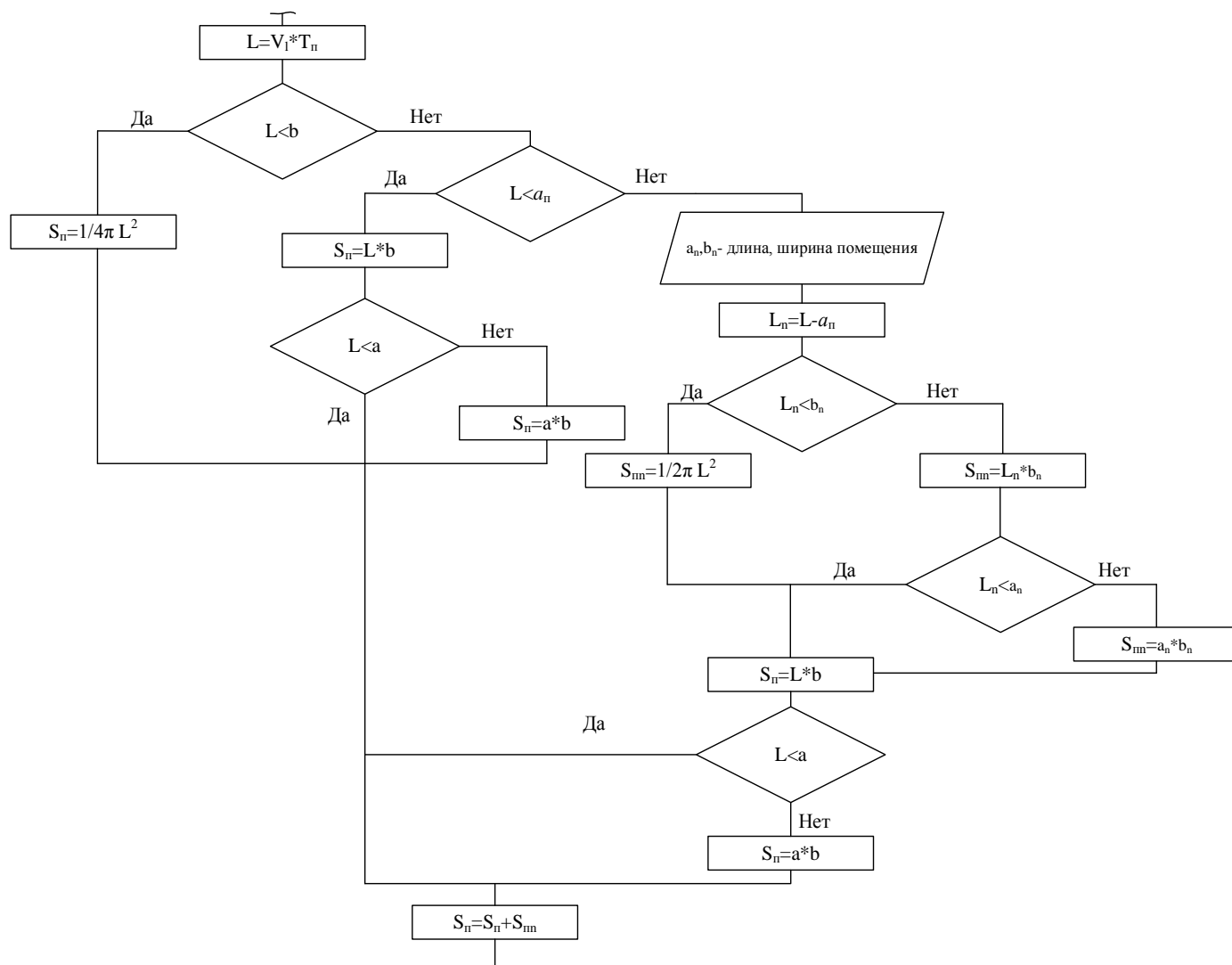


Рисунок 6.21 – Алгоритм расчета площади пожара  
(условие: пожар в углу помещения, есть проемы)

Таким образом, набор алгоритмов расчета наиболее вероятных сценариев развития пожара позволяет типизировать большинство возможных ситуаций, что повышает реалистичность моделирования процесса локализации за счет построения расчетной схемы полного цикла тушения пожара с момента подачи первого ствола до ликвидации открытого горения с учетом перерывов в подаче ОТВ.

Сочетание метода локализации пожара в зданиях объекта энергетики и методики оценки достаточности сил и средств пожарно-спасательных гарнизонов позволяют приступить к формированию концепции противопожарной защиты объектов энергетики с целью обеспечения локализации пожаров.

### **6.3 Концепция достаточности и предложения по составу сил и комплексу средств для локализации пожаров в зданиях объектов энергетики**

Оценка достаточности сил и средств для своевременного и непрерывного тушения пожара производится по методике, представленной в параграфе 6.2. Для определения достаточности сил для основных видов объектов энергетики проведен анализ возможностей пожарно-спасательного гарнизона по своевременному и непрерывному тушению возможного пожара. Анализируются сценарии пожаров помещений, которые могут привести к остановке технологического процесса выработки энергии, в зависимости от расположения объектов энергетики относительно сил пожарно-спасательного гарнизона.

Рассмотрены характерные случаи расположения объектов энергетики с точки зрения сосредоточения сил пожарной охраны и сложности организации тушения пожара в соответствии с классификацией, приведенной в параграфе 1.1:

- крупные объекты энергетики в крупных гарнизонах;
- крупные объекты энергетики в отрыве от крупных гарнизонов;
- средние объекты энергетики в малых гарнизонах;
- малые объекты энергетики в малых гарнизонах.

Учитывая сложность явления пожара, как с точки зрения его развития, так и тушения, при осуществлении графической интерпретации оценки достаточности сил и средств для своевременного и непрерывного тушения пожара учитывались максимальная и минимальная скорости распространения горения по каждому виду объектов, а также граничные значения скорости тушения пожара. Графики площади пожара, составленные с учетом граничных значений указанных показателей, позволили сформировать пессимистические и оптимистические сценарии развития и тушения пожаров. На рисунке 6.22 показаны результаты исследования с применением «Программы по оценке достаточности сил и средств тушения пожара» [291]. В качестве примера смоделировано тушение возможного пожара на объектах энергетики силами пожарно-спасательного гарнизона областного центра.

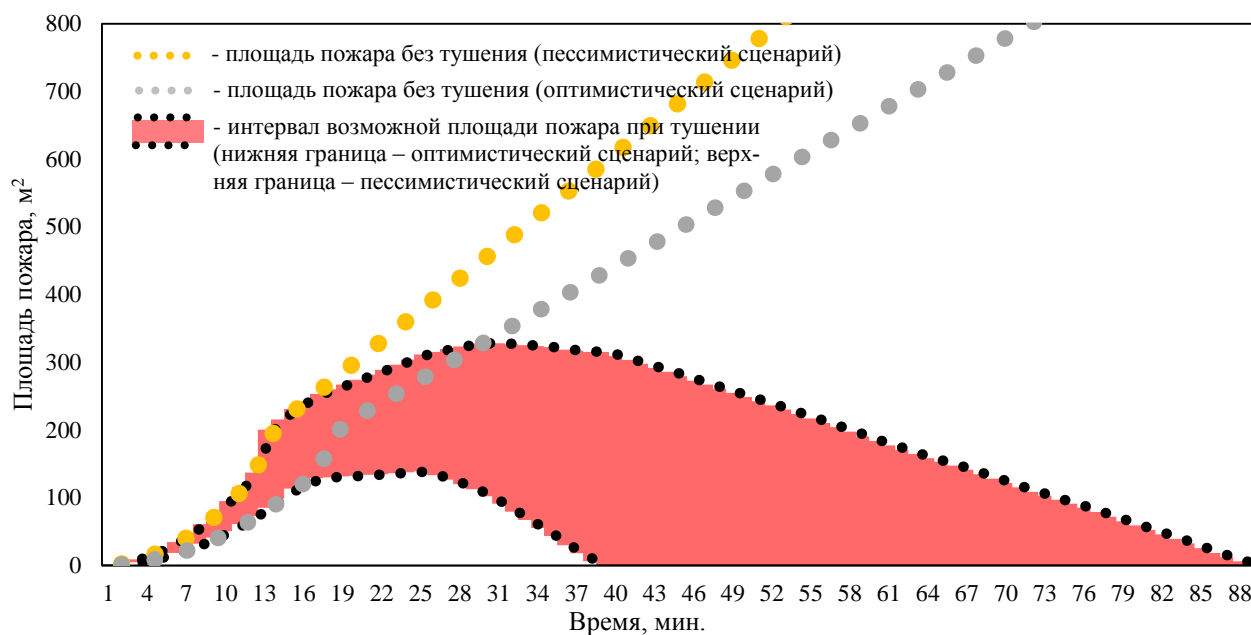


Рисунок 6.22 – Прогноз развития пожара и его тушения в машинном зале ТЭЦ, расположенной в крупном пожарно-спасательном гарнизоне (задействовано 16 отделений)

Как видно из рисунка 6.22, организацию сосредоточения и тушения пожаров объектов энергетики в крупных гарнизонах можно считать сбалансированной, так как сил гарнизона в большинстве случаев достаточно для тушения пожара даже на крупном объекте энергетики и время их сосредоточения находится в допустимых пределах, а техническое оснащение гарнизона позволяет осуществлять тушение пожаров в условиях воздействия ОФП и их сопутствующих проявлений.

Наибольшую сложность вызывает вопрос сосредоточения сил на крупных объектах энергетики, расположенных в отрыве от крупных гарнизонов, и средних объектах энергетики в малых гарнизонах. В этих случаях возникает критичный недостаток сил в стадии сосредоточения, приводящий к росту масштаба пожара. На рисунках 6.23 и 6.24 показаны результаты расчета для случая пожара крупного объекта энергетики, расположенного в отрыве от крупных гарнизонов.

Как показывают результаты расчетов по предложенной методике, в случае пессимистического сценария, когда невозможно обеспечить наращивание СиС ПО для обеспечения своевременного и непрерывного тушения пожара, пожарно-спасательный гарнизон не может предотвратить развитие пожара и объект энергетики выводится из строя.

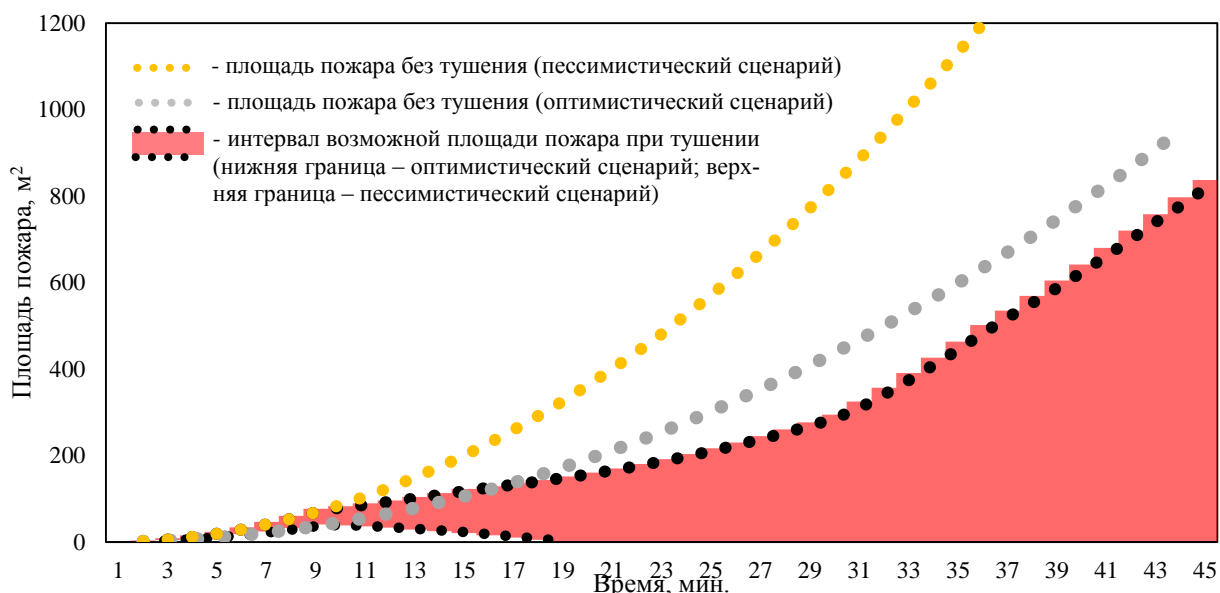


Рисунок 6.23 – Прогноз развития пожара и его тушения в машзале АЭС при тушении имеющимися силами местного пожарно-спасательного гарнизона (задействовано 17 отделений)

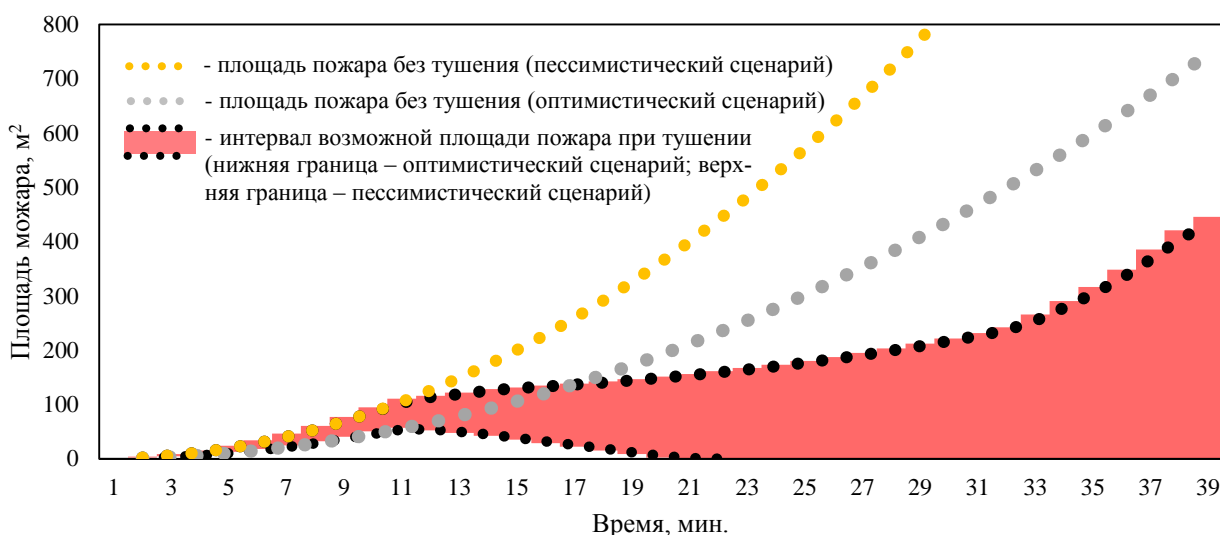


Рисунок 6.24 – Прогноз развития пожара и его тушения в машзале ГЭС при тушении имеющимися силами местного пожарно-спасательного гарнизона (задействовано 5 отделений)

Для достижения цели тушения пожара, наиболее «привычным» вариантом является увеличение сил и средств пожарной охраны, которые смогут обеспечить своевременное тушение пожара. В исходные данные программы «искусственно» добавляли отделения (звенья ГДЗС) в пожарно-спасательный гарнизон до момента, когда сил и средств гарнизона становилось достаточно для тушения пожара. Результаты расчетов представлены на рисунках 6.25–6.27.

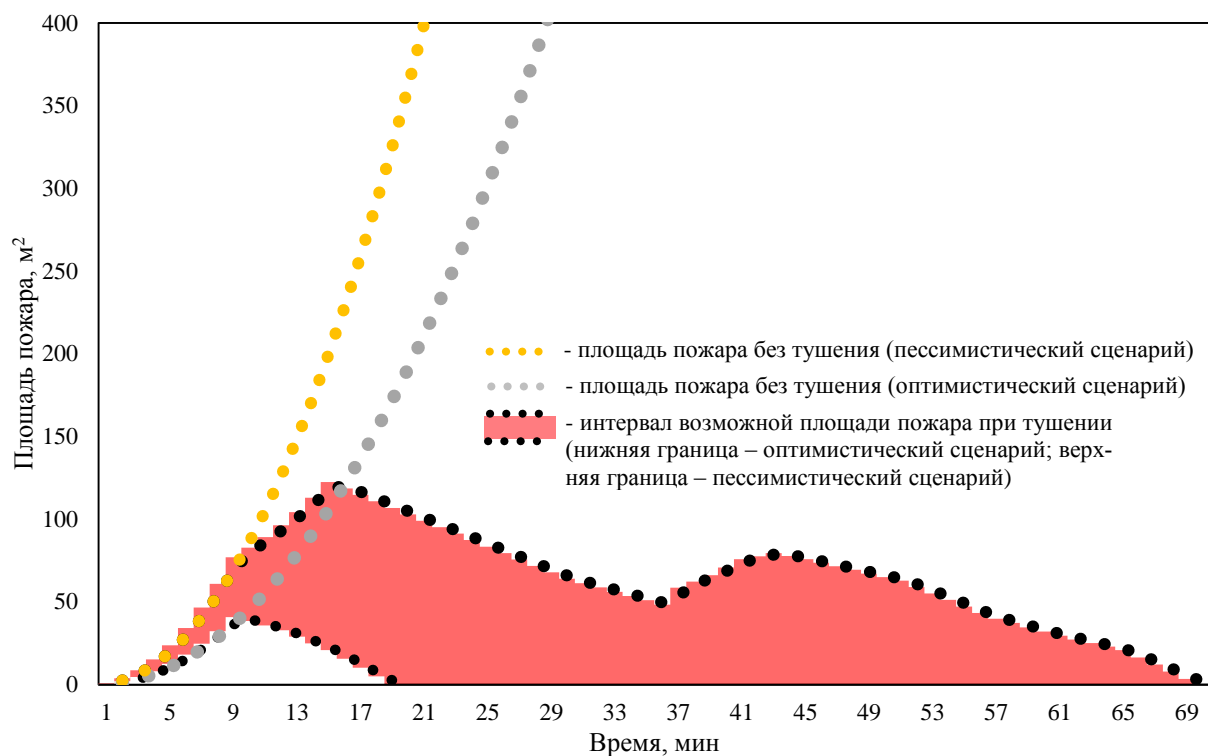


Рисунок 6.25 – Прогноз развития пожара в машинном зале АЭС при увеличении СиС на пять отделений (всего 22 отделения)

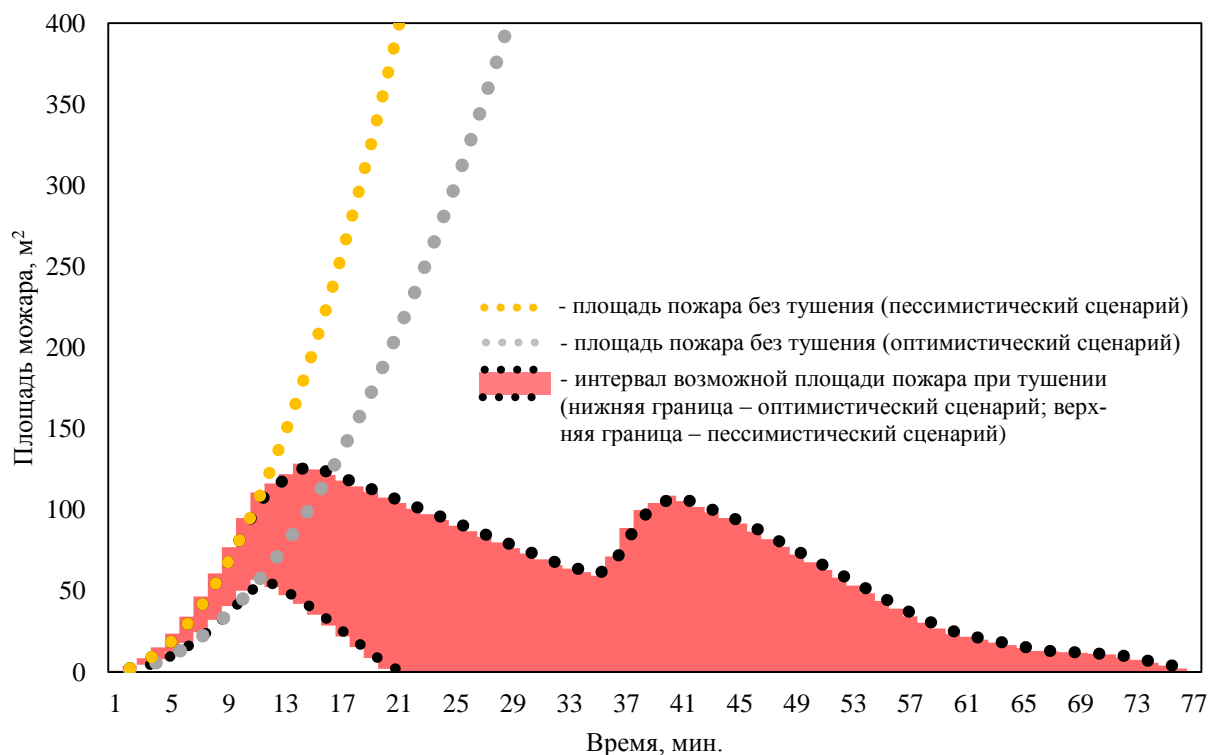


Рисунок 6.26 – Прогноз развития пожара в машинном зале ГЭС при увеличении СиС на четыре отделения (всего 9 отделений)

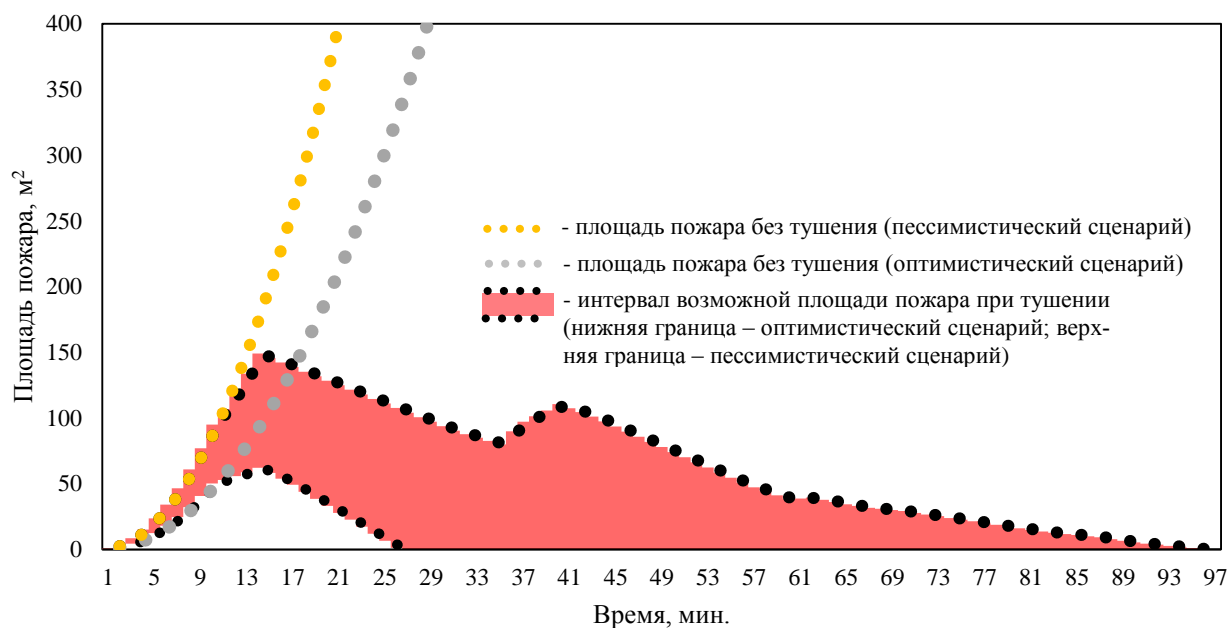


Рисунок 6.27 – Прогноз развития пожара в машинном зале ГЭС при увеличении СиС на три отделения (всего 8 отделений, пессимистический сценарий)

На рисунках 6.25–6.27 участки повышения площади пожара, не характерные для «классической» модели расчета, возникают из-за вынужденного вывода стволов звеньями ГДЗС (ограничение защитного времени действия СИЗОД).

Увеличение СиС пожарной охраны является надежным, но весьма затратным способом достижения цели тушения пожара. Так, в работе [288] приводится расчет затрат на одного сотрудника пожарной части. Результаты расчета показали, что затраты на одного пожарного за срок службы в течение 10 лет сопоставимы с обслуживанием пожарной техники (ее эксплуатации) в течение того же времени (рисунок 6.28).

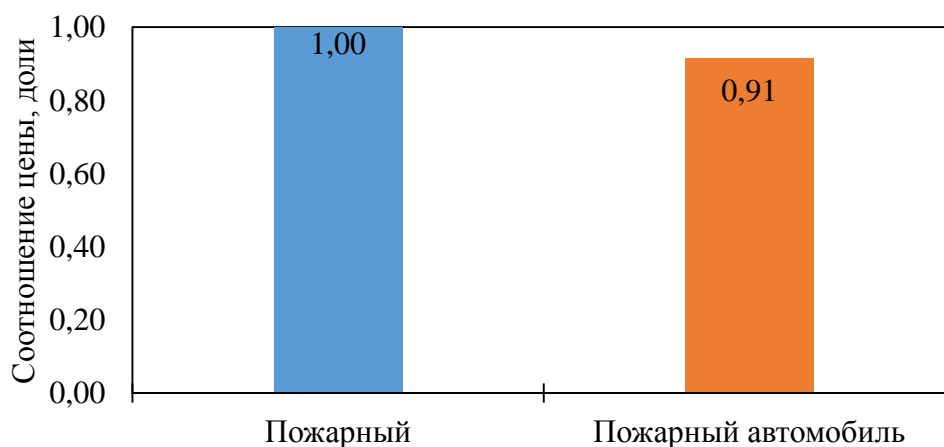


Рисунок 6.28 – Диаграмма сравнения затрат на содержание пожарного и основного пожарного автомобиля за десятилетний период

Другим вариантом обеспечения своевременного тушения пожара является внедрение технических средств тушения пожара и обеспечения деятельности пожарных подразделений по тушению пожара, оказывающих влияние на достижение цели тушения пожара. Проанализированные и разработанные в настоящей работе способы и технические решения могут изменить ход тушения пожара. Наиболее весомыми является обеспечение непрерывного на протяжении всего тушения пожара нахождения пожарных на позициях подачи огнетушащих средств и осуществление тушения развившихся пожаров в помещениях объемным способом от мобильных средств пожаротушения.

Одним из главных факторов, влияющих на бесперебойную работу пожарных стволов, поданных звеньями ГДЗС, является время защитного действия СИЗОД. Так, введя в исходные данные программы время защитного действия СИЗОД соответствующего ДАСК, получили, что пожарно-спасательные гарнизоны стали справляться с расчетным пожаром при увеличении численности гарнизона на одно отделение на основном пожарном автомобиле в случае пожара на АЭС (рисунок 6.29) и на два отделения в случае пожара на ГЭС (рисунок 6.30).

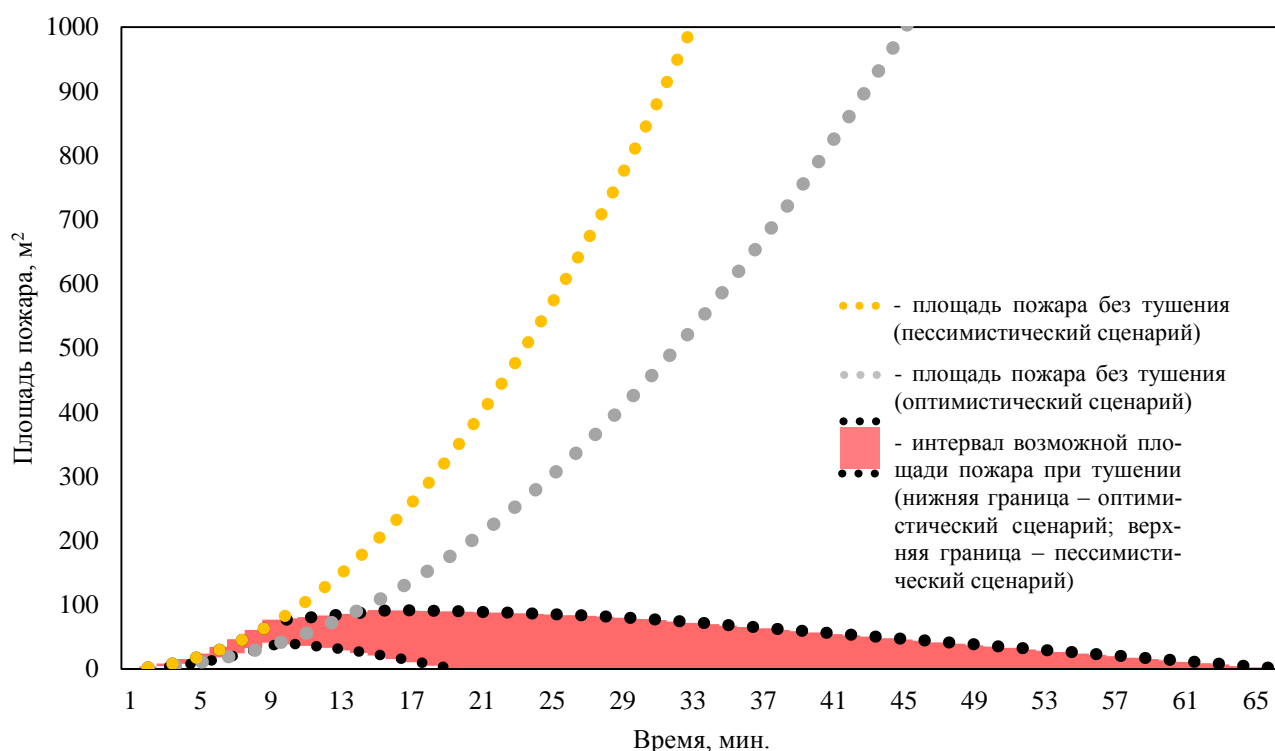


Рисунок 6.29 – Прогноз развития пожара в машинном зале АЭС при увеличении на одно отделение (всего 18 отделений) и замены дыхательных аппаратов с ДАСВ на ДАСК

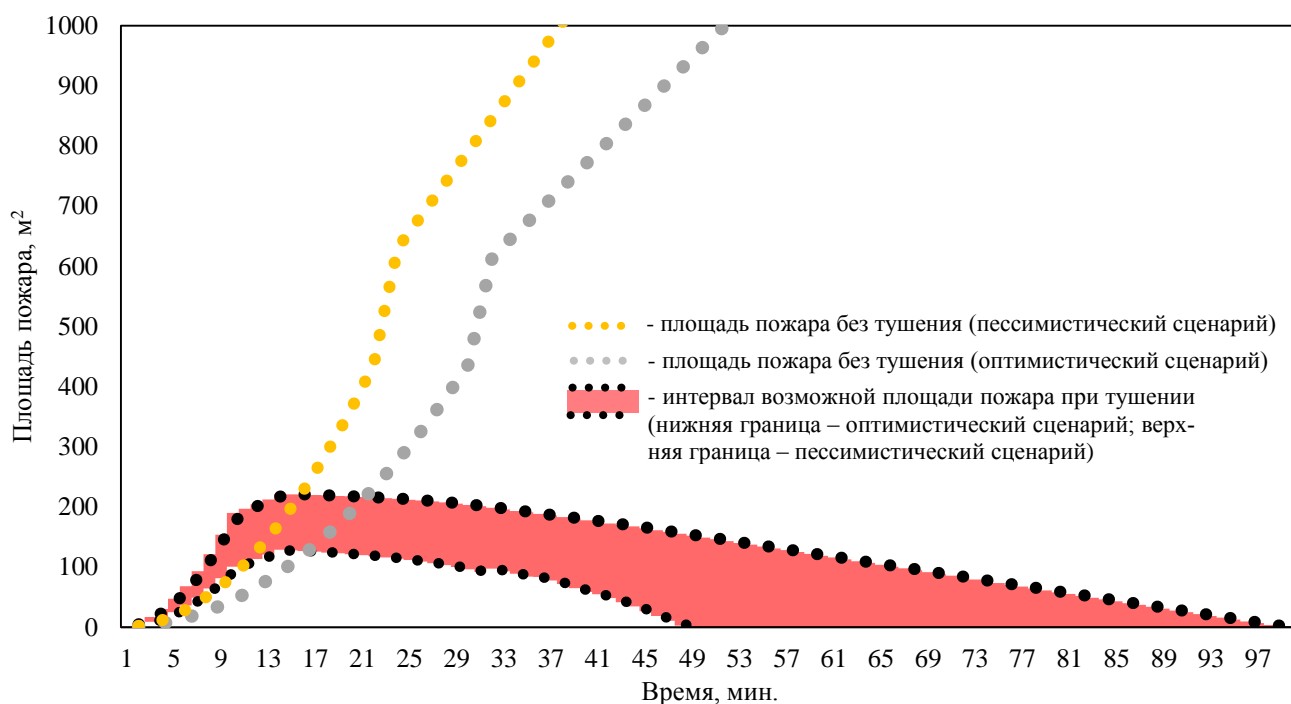


Рисунок 6.30 – Прогноз развития пожара в машинном зале ГЭС при увеличении на два отделения (всего 7 отделений) и замены дыхательных аппаратов с ДАСВ на ДАСК

В случае оснащения гарнизона техникой, способной обеспечить пожарных возможностью использовать объемное тушение при помощи струй ВСМФС, по расчетным данным с пожаром будет справляться объектовая часть, охраняющая объект (рисунки 6.31 и 6.32)

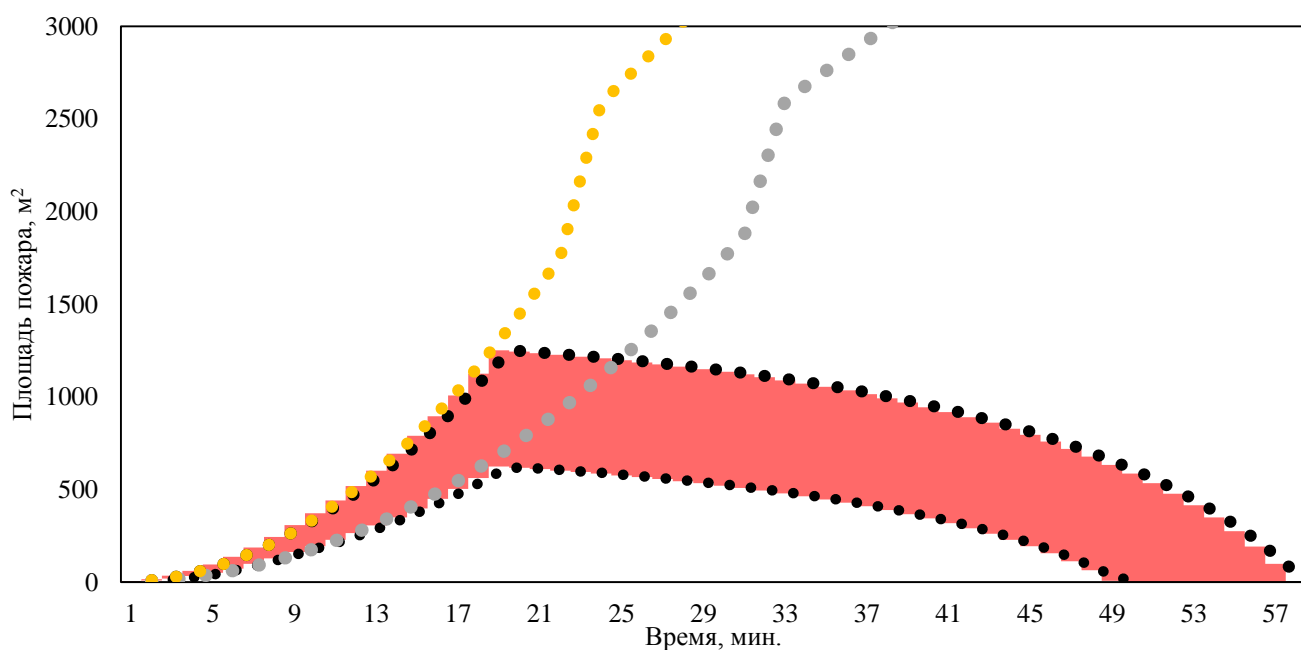


Рисунок 6.31 – Прогноз развития пожара в машинном зале АЭС при введении двух стволов ВСМФС с общим расходом 1 кг/с (всего три отделения)



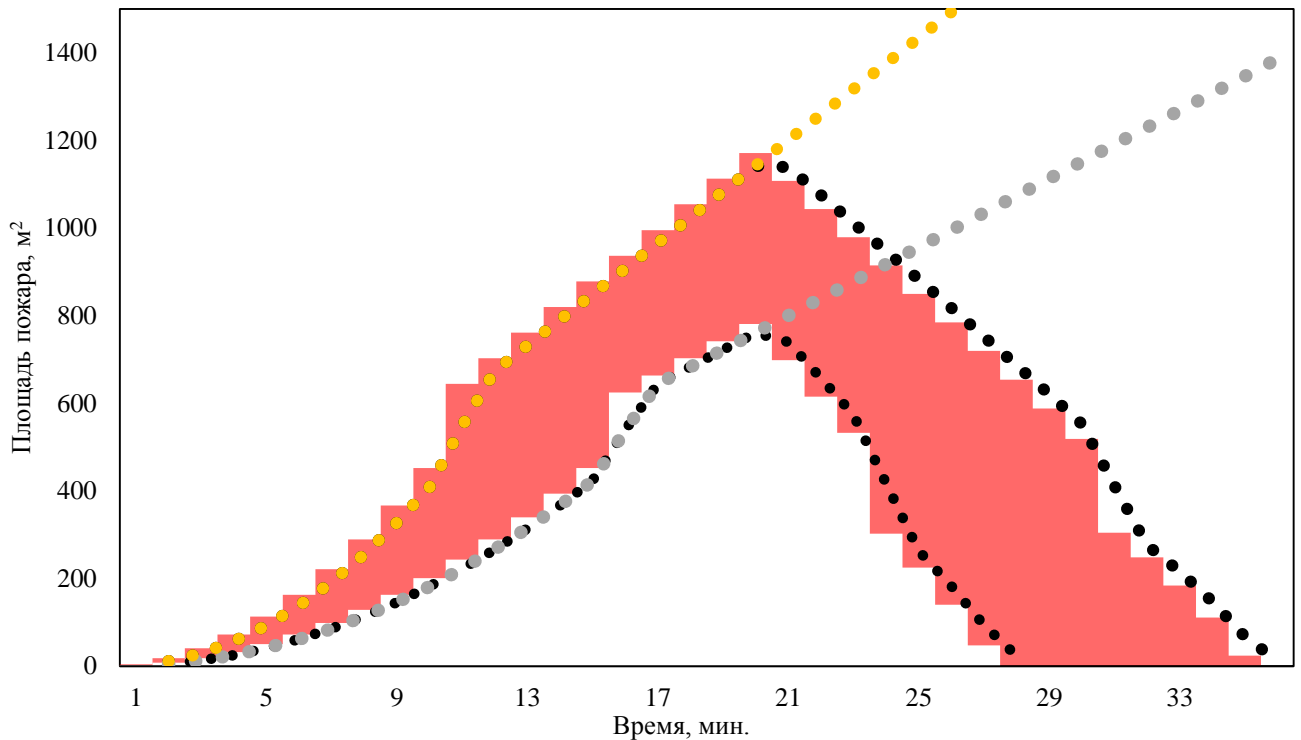


Рисунок 6.32 – Прогноз развития пожара в машинном зале ГЭС при введении одного ствола ВСМФС с расходом 0,5 кг/с (всего два отделения)

Анализ результатов расчетов показывает, что выполнить задачу по тушению пожара возможно даже при уменьшении численности гарнизона, но, соответственно, при оснащении его необходимыми техническими средствами.

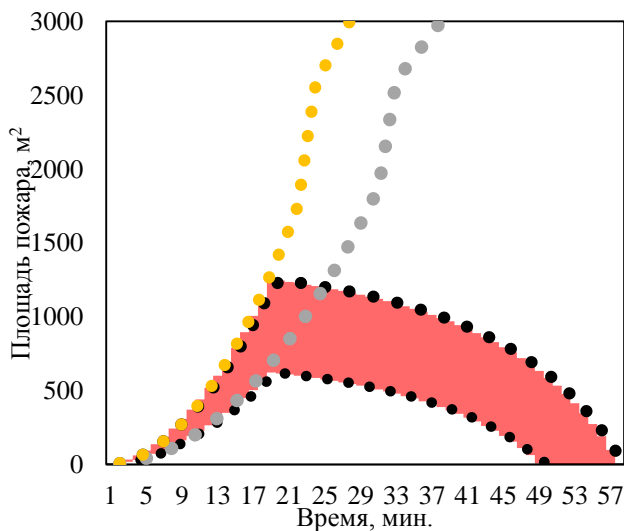


Рисунок 6.33 – Прогноз развития пожара в машзале АЭС при введении двух стволов ВСМФС с общим расходом 1 кг/с (всего три отделения)

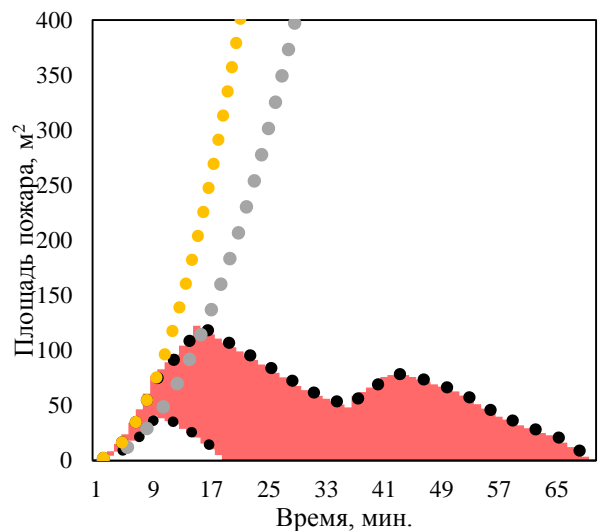


Рисунок 6.34 – Прогноз развития пожара в машзале АЭС при увеличении на пять отделений (всего 22 отделения, пессимистический сценарий)

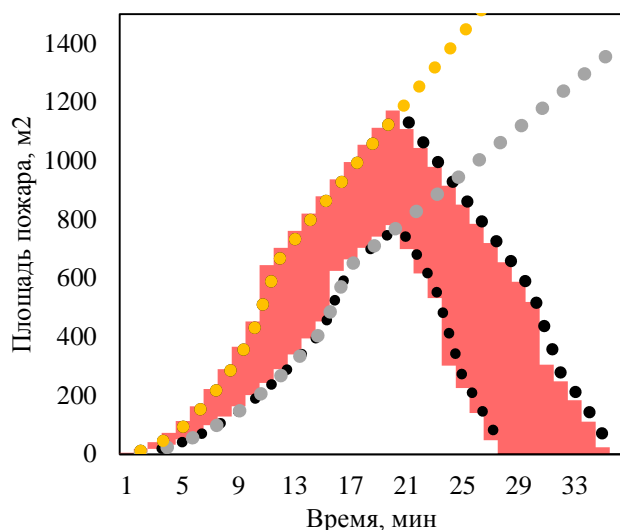


Рисунок 6.35 – Прогноз развития пожара в машзале ГЭС при введении одного ствола ВСМФС с расходом 0,5 кг/с (всего 2 отделения)

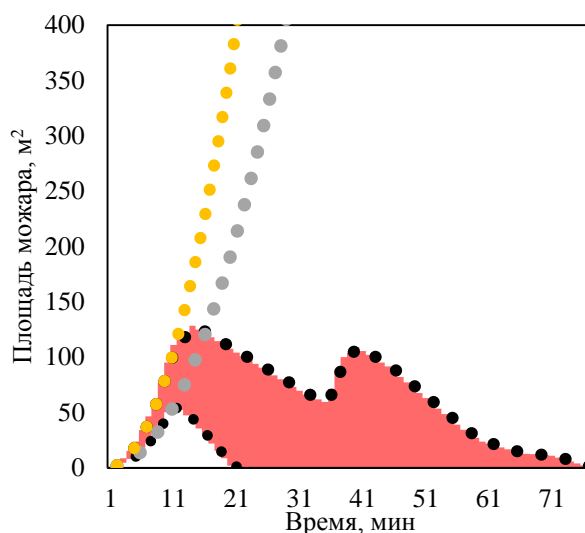


Рисунок 6.36 – Прогноз развития пожара в машинном зале ГЭС при увеличении на 4 отделения (всего 9 отделений, пессимистический сценарий)

Для сравнения уровня затрат на содержание дополнительной штатной численности на основных пожарных автомобилях и отделений, применяющих перспективные технические средства локализации пожара объекта энергетики, были сопоставлены схожие по исходу тушения результаты моделирования (рисунки 6.33–6.36).

Представленное сравнение моделей развития и тушения пожара одних и тех же помещений объектов энергетики посредством перспективной технологии меньшим числом пожарных и, напротив, путем увеличения числа отделений на основных пожарных автомобилях, показывает схожие результаты тушения. При этом соотношение числа задействованных отделений, позволяющее реализовать тактические возможности каждого вида техники, отличается от 4,5 до 7 раз. Учитывая, что для постановки одного отделения с боевым расчетом 6 единиц (командир отделения, водитель, четыре пожарных) в круглосуточный расчет требуется выделение 27 штатных единиц с учетом четырехсменного несения службы, увеличение на 4-7 отделений объектового ППО приведет к увеличению численности подразделения на 108-189 штатных единиц. Соотношение стоимости основного пожарного автомобиля к стоимости специального пожарного автомобиля, реализующего технологию объемного подавления горения, составляет 1:5, что, с учетом соотношения, приведенного на рисунке 6.28, говорит о возможности трех-шестикратного снижения расходов на содержание объектового ППО объекта энергетики при схожих тактических возможностях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ последствий пожаров объектов энергетики показал высокую вероятность их отрицательного влияния на работоспособность отдельных объектов энергетики и устойчивость энергетического сектора в целом, что влечет возникновение социально-экономических чрезвычайных ситуаций, связанных с нарушением жизнедеятельности населения из-за прекращения подачи энергии. Анализ реагирования подразделений пожарной охраны на пожары объектов энергетики, показал достаточную обеспеченность этих объектов огнетушащими веществами и средствами их подачи. В то же время излишнее расходование огнетушащих веществ показало сложность их подачи непосредственно в зону горения и в значительной степени обусловлено скрытостью зоны горения от пожарных за дымом, что подтверждается ростом применения пожарными средств защиты, обеспечивающих работу в условиях непригодной для дыхания среды на фоне снижения числа пожаров на объектах энергетики. Оценка дислокации сил и средств пожарно-спасательных гарнизонов показала, что на удаленных от крупных населенных пунктов и значимых для энергетики страны объектах (атомные, гидро- и теплоэлектростанции) недостаточно численности и технического оснащения пожарной охраны для своевременной локализации пожара, позволяющей сохранять работоспособность объекта энергетики.

2. Проведенным сравнительным моделированием сложности тушения пожаров на различных промышленных объектах и в помещениях объектов энергетики, приводящих к остановке выработки энергии, выявлена возрастающая сложность тушения, связанная со снижением скорости передвижения и дезориентацией в задымленных помещениях, повышенной физической нагрузкой из-за использования средств защиты, риском поражения электрическим током, большой горячей нагрузкой, сложной планировкой помещений и т.д. При этом в условиях распространяющегося задымления время на развертывание сил растет, что отдаляет по-

дачу огнетушащих веществ и не позволяет обеспечивать своевременную локализацию пожара, что в свою очередь приводит к остановке технологического процесса выработки энергии и созданию предпосылок к возникновению чрезвычайной ситуации, связанной с перебоем в подаче энергии населенным пунктам, объектам инфраструктуры или промышленности. Общая методология исследования сформирована в виде тактико-технического принципа формирования сил и средств, способных осуществить локализацию возникающего пожара на объекте энергетики с учетом сохранения его работоспособности.

3. На основе моделирования способов защиты участников тушения пожаров объектов энергетики от опасных факторов пожара предложен комплекс мер по снижению их воздействия. Разработана схема компоновки наиболее распространенного типа средств защиты органов дыхания, позволяющая улучшить эргономические и эксплуатационные характеристики. Разработан, смоделирован и экспериментально подтвержден эффект использования способа увеличения удельного времени защитного действия средств защиты участников тушения пожаров объектов энергетики от опасных факторов пожара на основе экономного расходования дыхательной смеси, что приводит к увеличению данного показателя на 20% при нагрузке средней тяжести и практически в два раза в режиме ожидания помощи. Предложен прототип комплекса технических средств обеспечения работ в непригодной для дыхания среде при тушении развившихся пожаров объектов энергетики с обоснованием технических решений, способствующих непрерывному тушению пожара, позволяющий оптимизировать состав технических средств обеспечения работ в непригодной для дыхания среде.

4. Прогнозное моделирование распространения опасных факторов пожара по помещениям объекта энергетики позволило определить время наступления критических показателей, воздействующих на оперативный персонал объектов энергетики. Обоснована целесообразность и возможность действий персонала объектов энергетики в начальной стадии развития пожара на объекте энергетики. Предложен комплекс организационно-технических решений по обеспечению действий персонала при возникновении пожара до начала работы подразделений пожарной

охраны. Его использование позволит увеличить возможность действий оперативного персонала на щитах управления объекта энергетики до 20 минут, а в помещении машинного зала - до 27 минут, что сопоставимо со временем прибытия подразделений пожарной охраны. Разработаны принципы и технические решения повышения уровня подготовки участников тушения пожара объектов энергетики к действиям в условиях воздействия опасных факторов пожара, в том числе малых гарнизонов, где недостаточно развита практическая составляющая подготовки к тушению пожара в условиях, приближенных к реальным.

5. Разработаны теоретические основы повышения тактических возможностей пожарных подразделений по локализации пожаров объектов энергетики за счет применения объемного способа тушения пожара от мобильных средств пожаротушения и разработки способов и средств улучшения видимости в дыму на основе использования водной среды в метастабильном фазовом состоянии, позволяющие меньшими ресурсами пожарной охраны и с меньшим риском осуществлять подавление горения в помещениях объектов энергетики, вплоть до самых больших и протяженных (машзалов и кабельных помещений). Экспериментально определено, что подачи водной среды в метастабильном фазовом состоянии с интенсивностью от 6 до 8 грамм воды на 1 м<sup>3</sup>/с достаточно для прекращения пламенного горения в защищаемом объеме, а применение способов осаждения дыма повышает светопрозрачность среды более чем в 2 раза, что позволяет пожарным приблизиться к помещению пожара и осуществить локализацию пожара объемным способом, не находясь при этом в помещении пожара.

6. Обоснован метод локализации пожаров объектов энергетики, позволяющий составлять оптимальные комбинации состава сил и средств пожарной охраны на основе математических моделей развития пожара и воздействия огнетушащих средств. Разработана методика оценки достаточности сил и средств пожарно-спасательных гарнизонов для обеспечения локализации пожаров объектов энергетики. С ее помощью впервые рассчитан характер и время тушения прогнозируемого пожара на основе полученных скоростей тушения пожаров для основных помещений объектов энергетики (от 26 до 89 м<sup>2</sup>/ч в зависимости от типа помещения), что дает

возможность определить состав и техническое оснащение сил и средств, требуемых для локализации пожара. Разработана компьютерная программа оценки достаточности сил и средств для тушения пожара объекта энергетики, которая учитывает различные варианты тактических действий подразделений пожарной охраны. Разработана концепция оптимизации противопожарной защиты объектов энергетики и составлен набор предложений по составу сил и комплексу средств, способных с учетом дислокации подразделений пожарной охраны осуществить локализацию возникающего пожара на объекте энергетики с целью сохранения его работоспособности, осуществление которых позволит достичь трех-шестикратного снижения расходов на содержание объектового подразделения пожарной охраны при сопоставимых тактических возможностях.

Совокупность результатов исследования, основанных на теории локализации пожаров объектов энергетики, сведенная в метод локализации данных пожаров с использованием разработанных способов повышения тактических возможностей пожарных подразделений, обоснованной возможности и готовности персонала объектов энергетики к тушению пожаров в начальной стадии, применением усовершенствованных средств защиты участников тушения пожаров объектов энергетики от опасных факторов пожара позволяет достичь цели исследования – разработки и реализации теории локализации пожара, направленной на сохранение работоспособности объекта энергетики, в том числе удаленного от крупных пожарно-спасательных гарнизонов, а также развития и воплощения теоретических основ жизнеобеспечения участников тушения пожара в условиях воздействия опасных факторов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авария в энергосистеме Москвы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.1tv.ru/news/social/74370> (Дата обращения 04.09.2015).
2. Чернобыль. Мифы и факты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/spec/chernobyl> (Дата обращения 04.09.2015).
3. Катастрофа на Фукусиме [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chernobyl-zone.info/katastrofa-fukusima-v-yaponii-prichiny-i-posledstviya.html> (Дата обращения 04.09.2015).
4. Микеев, А.К. Противопожарная защита АЭС [Текст] / А.К. Микеев – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 432 с.
5. Провести исследования и разработать рекомендации по тактике тушения пожаров в машинных залах и кабельных помещениях АЭС: заключительный отчет о НИР [Текст] / А.А. Шаповалов. – Москва: ВНИИПО, 1987. – 110 с.
6. Алёхин Г.Г. Анализ аварийных ситуаций на теплоэлектростанциях // Молодой ученый. – 2018. – № 42. – С. 1–3. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/228/53201/> (дата обращения: 05.07.2019).
7. Объекты энергетики [Электронный ресурс] // Энергетическое сообщество России. – Режим доступа: <http://www.ensor.ru/info/objects> (Дата обращения 11.03.2016)
8. Методические рекомендации руководителю тушения пожара по организации и проведению тактической вентиляции зданий и сооружений при тушении и ликвидации последствий ЧС на территории города Москвы [Текст] – М.: ГУ МЧС России по г. Москве, 2014. – 78 с.
9. Пожары и пожарная безопасность в 2013 году [Текст]: статистический сборник / Под общей редакцией В.И. Климкина. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2014. – 137 с.

10. Пожары и пожарная безопасность в 2014 году [Текст]: статистический сборник / Под общей редакцией А.В. Матюшина. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2015. – 124 с.
11. Пожары и пожарная безопасность в 2015 году [Текст]: статистический сборник / Под общей редакцией А.В. Матюшина. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2016. – 124 с.
12. Пожары и пожарная безопасность в 2016 году [Текст]: статистический сборник / Под общей редакцией Д.М. Гордиенко. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2017 – 124 с.
13. МЧС России [Электронный ресурс] // Официальный сайт МЧС России. – Режим доступа: [http://www.mchs.gov.ru/activities/stats/Chrezvichajnie\\_situacii/2005](http://www.mchs.gov.ru/activities/stats/Chrezvichajnie_situacii/2005) (Дата обращения 18.11.2015 г.).
14. Две электростанции в Якутии отключены после пожара на ГРЭС [Электронный ресурс] // Известия. – Режим доступа: <https://iz.ru/652803/2017-10-01/dve-elektrostantsii-v-iakutii-otkliucheny-posle-pozhara-na-gres> (Дата обращения 18.11.2017 г.).
15. Постановление Правительства РФ от 13.09.1996 г. № 1094 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (утратило силу) [Электронный ресурс] // Система Гарант. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/2107712> (Дата обращения 04.07.2017 г.).
16. Постановление Правительства РФ от 21.05.2007 № 304 (ред. от 17.05.2011) «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_68490/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_68490/) (Дата обращения 04.07.2017 г.).
17. Федеральный закон Российской Федерации от 22.07.2008 г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (ред. от 13.07.2015). [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_law\\_78699/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_78699/) (дата обращения: 12.03.2016).



18. Федеральный закон от 21.12.1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс] // Система ГАРАНТ. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/10107960/#ixzz5SU1ZJquj> (Дата обращения 06.07.2017 г.).
19. Ungedundene Helfer im Katastrophenschutz. Kircher Frieder. Brandschutz. 2014. 68, №8, pp. 593-597, Feuerwehr Bielefeld: Ausbildung im Bereich Gefährliche Stoffe und Güter. Zollner Heinz-Hermann, Edelmeyer Sven. Brandschutz. 2014. 68, № 10, pp. 763-766
20. Windkraft: Bei einem Brand geht's rund. Nikola Ulrike. Brandwacht. 2014. 69, pp. 112-114
21. Vernetzung bei der Hochwasserbekämpfung 2013. Böttche Christina. Brandschutz. 2014. 68, № 8, pp. 598-600
22. Gefährdungsdeurteilung für Feuerwehr-Einsatzübungen. Wolf Torsten, Winnefeld Lutz, Wobbecke Frank, Reich Rolf et. al. Brandschutz. 2014 68, № 9, pp. 667-669
23. Energy balance in a confined fire compartment to assess the heat release rate of an electrical cabinet fire, Coutin M., Plumecocq W., Melis S., Aubouin L, Fire Safety J. 2012. 52, pp. 34-45
24. Brandschutzwissen für die Elektrofachkraft: Brandentstehung. Kies W., Link M. DE: Elektrohadwerk. 2015. 90, 5, pp. 74-75
25. Комков, П.М. Специфика пожарной опасности реакторных установок с реакторами типа БН и обзор экспериментальных исследований по горению с натриевым теплоносителем [Текст] / П.М. Комков, А.И. Рябиков, Д.И. Пуцев, В.Н. Борисов и др.// Пожарная безопасность. 2016. № 4, С. 97-100.
26. Thermal malfunction criteria of safety electrical equipment in nuclear power plants. Gay L., Gracia R., Wizenne E. Fire and Mater. 2013. 37, № 2, pp. 151-159
27. Wirksamer Brandschutz für Turbinen stellt hohe Verfügbarkeit sicher. Knop Arnd. VGB PowerTech. Int.Ed. 2013. 93, № 8, pp. 50-53
28. Schaummittel in ortsfesten Löschanlagen. Copp Chi. Schadenprisma. 2013. 42, № 4, pp. 8-10

29. Пуцев, Д.И. Анализ безопасности и решения противопожарной защиты АЭС [Текст] / Д.И. Пуцев, В.Н. Борисов, А.И. Рябиков // Пожарная и аварийная безопасность: Сборник материалов 10 Международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию МЧС России. Иваново, 2015, С 67-75

30. СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения (с изменением №1)» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200071155/> (дата обращения: 12.03.2016).

31. СП 232.1311500.2015 «Пожарная охрана предприятий. Общие требования» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200122147> (дата обращения: 12.03.2016).

32. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: приказ МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404: (зарегистрировано в Минюсте РФ 06.08.2009 №14486): (в ред. от 12.12.2011) // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. дан. – М., 2014. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (Дата обращения 22.07.2015)

33. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (Зарегистрировано в Минюсте РФ 06.08.2009 г. № 14486) [Электронный ресурс]: Приказ МЧС РФ от 30.06.2009 № 382 (ред. от 12.12.2011) // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc; base=LAW;n=125011; div=LAW; dst=100002,2; rnd=184768.3882344157900661> (дата обращения: 02.04.2016).

34. Брушлинский, Н.Н. Управление безопасностью сложных социально-экономических и технических систем [Текст] / Н.Н. Брушлинский, Ю.М. Глуховенко, С.В. Соколов // В кн.: Юбилейный сборник трудов Академии ГПС МЧС России. М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. С. 15–49.

35. Брушлинский, Н.Н. Математическая модель оперативной деятельности пожарной охраны города [Текст] / Н.Н. Брушлинский, Н.Н. Соболев // В кн.: Стационарные и передвижные средства борьбы с пожарами. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985. С. 69–76.

36. Бирюков, М.С. Методика оценивания уровня противопожарного состояния опасных производственных объектов в условиях динамического изменения параметров среды функционирования [Текст] / А.С. Смирнов, М.С. Бирюков // Актуальные проблемы защиты населения и территорий от пожаров и катастроф: Материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 21 июня 2006 г. СПб.: СПбИ ГПС МЧС России, 2006.

37. Методические рекомендации по оценке эффективности деятельности территориальных органов МЧС России в области гражданской обороны и предупреждения чрезвычайных ситуаций (УТВ. МЧС РОССИИ 23.04.2012 № 2-4-87-9-14).

38. Василишин, И.И. Чрезвычайные ситуации: правовые аспекты: Монография [Текст] / И.И. Василишин. – Новогорск: Академия ГЗ МЧС России, 2003. – 115 с.

39. Фефелов, В.В. Федеральное законодательство в сфере пожарной безопасности [Текст] / В.В. Фефелов, М.Ю. Котова // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблемы безопасности и защиты населения и территорий от ЧС (Безопасность – 2011)». – Уфа, 2011. – С. 268–273.

40. Фефелов, В.В. Правовые основы обеспечения пожарной безопасности в РФ. Учебное пособие [Текст] / В.В. Фефелов. – Уфа: УГАТУ, 2008 – 152 с.

41. Пуцев, Д.И. Пожарная безопасность атомных станций [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Пуцев Дмитрий Игоревич. – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2011. – 47 с.

42. Die bedeutung von Rauh- und Luft-Strömungen im Brandeinsatz. Reick Michael. Brandschutzl. 2015; Beschaffung von Einsatzmitteln. Pinkenburg Günther, Zawadke Thomas. Brandschutz. 2014. 68, № 11, pp. 825-831

43. СТО 1.1.1.03.002.1069-2015. Противопожарные требования при проектировании атомных электростанций [Текст]. – Введ. 21.03.2016. – АО «Концерн Росэнергоатом» 2015. – 60 с.
44. Full-scale vertical combustion test of PVC cable and computational fluid dynamics study. Fu Qiang, Zhang He-Ping. J. Appl. Fire Sci. 2012-2013. 22. №1, pp. 81-91
45. Discussion on the fire design problems in a large professional mall. Chen Xing. Xiaofng kexue yu jishu = Fire Sci. and Technol. 2015. 34, № 2, pp. 187-189
46. Badania doswiadczone reakcji na ogien kabli elektrycznych. Klapsa Wojciech, Bodalski Dawid, Suchecki Sylwester. BiTP: Bezpiecz. I Techn. Pozar.2014. 35, № 3, pp. 97-105
47. На Курской АЭС отключился энергоблок из-за возгорания на трансформаторе [Электронный ресурс] // ТАСС. – Режим доступа: <http://tass.ru/proisshestiya/4969457> (Дата обращения 20.02.2018 г.).
48. ВТБ Капитал оценил возможные потери Э. ОН Россия от аварии на Березовской ГРЭС [Электронный ресурс] // BigPower. – Режим доступа: <http://www.bigpowernews.ru/markets/document68582.phtml> (Дата обращения 19.03.2016 г.).
49. Притворов, А.П. Атлас риска пожаров на территории Российской Федерации [Текст] / А.П. Притворов. – М: Фиория, 2011. – 211 с.
50. Белов, В.В., Пергаменщик, Б.К. Компонентные решения ТЭС как фактор снижения последствий крупных аварий [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. – 2014. – №5 (197). – Режим доступа: [www.nts.ru/zhurnale/archiv/2014/5\\_2014.html](http://www.nts.ru/zhurnale/archiv/2014/5_2014.html)
51. Белов, В.В. Крупные аварии на ТЭС и их влияние на компонентные решения главных корпусов [Текст] / В.В. Белов, Б.К. Пергаменщик // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 61–69.
52. Терентьев, И.А. Анализ пожаров, произошедших на тепловых электростанциях Минтопэнерго РФ за 1992 год [Текст] / И.А. Терентьев, Б.Х. Раев, В.А. Валитов, Г.А. Пименова, А.С. Соколова, Т.Н. Цветкова. – М.: СПО ОРГРЭС, 1993. С.37.

53. МТ-34-70-001 -95. Методика расчета экономического ущерба от нарушений в работе энергетического оборудования. М.: ПИИНИИ «Энергосетьпроект», 1995.

54. Ищенко, А.Д. О некоторых особенностях организации деятельности местных гарнизонов пожарной охраны [Текст] / А. Д. Ищенко // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: сборник материалов международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 2. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 126–127.

55. Приказ МЧС РФ от 26 декабря 2014 № 727 «О совершенствовании деятельности по формированию электронных баз данных учета пожаров (загораний) и их последствий» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс [сайт]. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=613669#0> (Дата обращения 27.12.2016 г.).

56. Бессонная ночь в потухшем Яр-Сале: ликвидация последствий аварии на электростанции [Электронный ресурс] // Ямальский район: официальный интернет-портал [сайт]. – Режим доступа: <http://mo-yamal.ru/novosti/rn/2139.php> / (Дата обращения 24.12.2015 г.).

57. Тушение пожаров в электроустановках [Текст] / Кашолкин Б. И., Мешалкин Е. А. // М.: Энергоатомиздат. 1985. 111 с.

58. Монтаж, эксплуатация и ремонт промышленных электрооборудования промышленных предприятий и установок [Текст] / Зюзин А.Ф., Поконов Н.З., Антонов М.В. // М.: Высшая школа. 1986. 416 с.

59. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. в 2 книгах; кн. 1 [Текст] / Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Ковальчук Г. Н. и др. – М.: Химия. 1990. 496.

60. Маслонаполненные кабели 110 кВ [Текст] / Макиенко Г.П., Попов Л.В. – М.: Энергия, 1979. 492 с.

61. Пожарная безопасность технологических процессов [Текст] / Швырков С.А. и др. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. 338 с.

62. Приказ Минтруда России от 30 июня 2009 № 1100н «Об утверждении правил по охране труда в подразделениях федеральной противопожарной службы

Государственной противопожарной службы» (Зарегистрировано в Минюсте России 08.05.2015 № 37203) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс [сайт]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_179591](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_179591) (Дата обращения 10.05.2017 г.)

63. Харламенков, А.С. Требования боевого устава подразделений пожарной охраны к участникам тушения пожара при наличии электроустановок под напряжением [Текст] / А.С. Харламенков // Пожаровзрывобезопасность. 2018. 27, №4, С. 70–72.

64. Алешков, М.В. Применение сплошных водных струй при тушении электроустановок под напряжением на объектах атомной энергетики [Текст] / М.В. Алешков, Р.А. Емельянов, А.А. Колбасин, В.Д. Федяев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2014 – № 4. – С. 17–23.

65. Алешков, М.В. Условия применения современных технологий пожаротушения для ликвидации пожаров электрооборудования под напряжением [Текст] / М.В. Алешков, Р.А. Емельянов, А.А. Колбасин, В.Д. Федяев // Пожаровзрывобезопасность. – 2016 – Т. 25. – № 6. – С. 12–18.

66. Соковнин, А.И. Условия видимости для пожарных в задымлённой зоне при тушении пожаров на объектах энергетики [Электронный ресурс] / А.Д. Ищенко, В.Д. Федяев // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – вып. 3 (67). – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/26-03-16.ttb.pdf>.

67. Feuerwehr Langen: Installation einer Atemschutz-Notfall-Trainierten-Staffel. Buchold Christian. Brandschutz. 2016. 70, № 1, pp. 16-21

68. Горбань, М.Ю. Защита объектов энергетики при помощи установки автоматического пожаротушения на базе лафетных стволов с осцилляторами [Текст] / М.Ю. Горбань, А.Н. Ким // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2017. – № 11. – С. 66–69.

69. Михайлов, Е.С. Применение термоагрессивостойких аварийных изолирующих костюмов при тушении пожаров с угрозой воздействия аварийно химически опасных веществ [Текст] / Е.С. Михайлов, В.И. Логинов // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – 278 с.

70. Ищенко, А.Д. Особенности организации оперативно-тактических действий при локализации чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах с использованием специальной защитной одежды изолирующего типа [Текст] / А.Д. Ищенко, Е.С. Михайлов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2018. – № 1(36). – С. 43–48.
71. Драйздейл, Д. Введение в динамику пожаров [Текст]/ Драйздейл Д. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
72. Тактика тушения электроустановок, находящихся под напряжением: Рекомендации [Текст]. – Введ. 19.12.1985. – М.: ВНИИПО, 1986. – 17 с.
73. ТИ 1.1.8.01.1017–2015. Типовая инструкция по тушению пожаров на электроустановках под напряжением до 10 кВ [Текст]. – Введ. 02.12.2015. – ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2015. – 60 с.
74. Чижиков, В.П. Физико-химические способы борьбы с задымленностью при пожарах [Текст] / В.П. Чижиков, Д.Х. Кулев – М.: ГИЦ МВД СССР, 1989. – 56 с.
75. Соковнин, А.И. Осаждение дыма на объектах энергетики температурно-активированной водой [Текст] / А.И. Соковнин, В.В. Роевко, А.Д. Ищенко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016 – № 1. – С. 54–59.
76. Иванников, В.П. Справочник руководителя тушения пожара [Текст] / В.П. Иванников, П.П. Ключ. – М.: Стройиздат, 1987 – 288 с.
77. Терещнев, В.В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений [Текст] / В.В. Терещнев. – М.: Пожкнига, 2004. – 256 с.
78. Верзилин, М.М. Пожарная тактика [Текст] / М.М. Верзилин, Я.С. Повзик. – М.: Спецтехника, 2007. – 440 с.
79. Скородинский, В.В. Пожарная тактика и противопожарная служба гражданской обороны (методическая разработка по первоначальной подготовке) [Текст] / В.В. Скородинский, А.С. Левченко, А.В. Коваленко и др. – Волгодонск, 2000. – 184 с.

80. Пузач, С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности [Текст] / С. В. Пузач – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

81. Рыжов, А. М. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: Методические рекомендации [Текст] / А.М. Рыжов, И.Р. Хасанов, А.В. Карпов, А.В. Волков, В.В. Лицкевич, А.А. Дектерев – М.: ВНИИПО, 2003. – 35 с.

82. McGrattan, K. Fire Dynamics Simulator (Version 6) / K. McGrattan, B. Klein, S. Hostikka, J. Floyd. National Institute of Standards and Technology, 2013, special publication 1018. 149 p.

83. Spalding, D. B. Older and newer approaches to the numerical modelling of turbulent combustion / D. B. Spalding // 3-rd International Conference on Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines. London: IMochE, 1996, pp. 25–37.

84. Welch, S., SOFIE: Simulation of Fires in Enclosures / S. Welch, P. Rubini. User Guide. United Kingdom: Cranfield University, 1996. – 340 p.

85. Пузач, С.В. Полевая модель расчета тепломассообмена при пожаре [Текст] / С.В. Пузач – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. – 84 с.

86. Пузач, С. В. Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара. Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 08.12.2006.

87. Пузач, С. В. Определение огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального пожара. Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614237 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 08.12.2006

88. McGrattan, K. Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. Volume 3: Validation / K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm. National Institute of Standards and Technology, 2007, special publication 1018-5. 86 p.



89. Справочное пособие по пожарной тактике. Учебное пособие [Текст] / П.Г. Демидов, Н.М. Евтюшкин, В.Д. Ледовских, Г.И. Пантелеев, Я.С. Повзик, Н.С. Холошня. – М.: ВИПТШ, 1975 – 177 с.

90. Пожарная тактика: учебное пособие для технических училищ и начальствующего состава пожарной охраны [Текст] / И.Ф. Кимстач, П.П. Девлишев, Н.М. Евтюшкин. – М.: Стройиздат, 1984. – 590.

91. Пожарная тактика: учебное пособие [Текст] / Я.С. Повзик, П.П. Ключ, А.М.Матвейкин. – М.: Стройиздат, 1990 – 336 с.

92. Пожарная тактика: Основы тушения пожаров: учебное пособие [Текст] / В. В. Терехнев, А. В. Подгрушный. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012 – 322 с.

93. Пожарная тактика: учебное пособие [Текст] / А.П. Решетов, А.В. Башаричев, В.В. Ключ; под общ. ред. В.С. Артамонова. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2011. – 324 с.

94. Родкин, М. В. Параметризация режима редких экстремально сильных событий-катастроф [Текст] / М. В. Родкин, В. Ф. Писаренко, Т. А. Рукавишникова // Геоэкология – 2007 – №2. – С. 164–172.

95. Об утверждении Положения о пожарно-спасательных гарнизонах [Электронный ресурс]: приказ МЧС России от 25.10.2017 № 467 (зарегистрировано в Минюсте России 09.02.2018 № 49998) // Система Гарант. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/71833064/> (дата обращения 12.12.2019)

96. Сверчков, Ю.М. Организация газодымозащитной службы на пожарах. Учебное пособие / Ю.М. Сверчков, И.В. Коршунов, Д.В. Андреев. М.: Академия ГПС МЧС России, 2014.

97. Об утверждении Правил проведения личным составом федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы аварийно-спасательных работ при тушении пожаров с использованием средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения в непригодной для дыхания среде [Электронный ресурс]: приказ МЧС РФ от 09.01.2013 г. № 3 (зарегистрировано в Минюсте РФ 15.03.2013 г. Регистрационный № 27701) // Консорциум: электронный фонд

нормативно-правовой документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902396377> (дата обращения 21.12.2019).

98. Таранцев, А.А. Случайные величины и законы их распределения [Текст] / А.А. Таранцев. – СПб.: Петрополис, 2005. – 54 с.

99. Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ [Электронный ресурс]: приказ МЧС России от 16.10.2017 №444 (зарегистрировано в Минюсте России 20.02.2018 № 50100) // Консорциум: электронный фонд нормативно-правовой документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/542610435> (дата обращения 01.01.2020).

100. Системы противопожарной защиты. Источники наружного противопожарного водоснабжения. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс] Свод правил СП 8.13130.2009. (утв. Приказом МЧС России от 25.03.2009 № 178) (ред. от 09.12.2010) // Консорциум: электронный фонд нормативно-правовой документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200071151> (дата обращения 01.01.2020).

101. Ищенко, А.Д. О построении уточненного совмещенного графика для расчета сил и средств для тушения пожара / А.Д. Ищенко, В.В. Ключ, С.В. Польшко, А.А. Таранцев // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27, № 2-3. – С. 82–92. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.82-92.

102. Жолен, Л. Прикладной интервальный анализ [Текст] / Л Жолен, М. Кифер, О. Дидри, Э. Вальтер. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 468 с.

103. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей. Изд. 10-е [Текст] / Е.С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 1998, 575 с.

104. Таранцев, А.А. О связи интервального анализа с теорией вероятностей [Текст] / А.А. Таранцев // Заводская лаборатория. – 2004. – Т.70. – № 3. – С.60–65.

105. Нодь, А.П. О суммировании случайных величин (на примере оценки движения мобильных объектов) / А.П. Нодь, А.А. Таранцев // Проблемы безопасности и ЧС. 2015. – № 4. – С. 112–120.

106. Таранцев А.А. Случайные величины и работа с ними [Текст] / Учебное пособие, изд. 2-е, перераб и доп. СПб.: Изд. дом «Петрополис», 2011. – 160 с.

107. Ищенко, А.Д. Обеспечение деятельности подразделений пожарной охраны на месте пожара [Текст] / А.Д. Ищенко, А.И. Соковнин // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: сб. статей. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С.196–198.

108. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования [Электронный ресурс]: Свод правил СП 5.13130.2009 // Консорциум: электронный фонд нормативно-правовой документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200071148> (дата обращения 15.12.2019)

109. Шиббаев, Г.И. Основы техники безопасности и противопожарной техники [Текст] / Г.И. Шиббаев, В.А. Гончарюк, В.Т. Полозков, М.В. Скорняков // М.: Недра, 1967. 228 с.

110. Пряничников, А.В. Тушение проливов нефти и нефтепродуктов метастабильными парокпельными струями воды [Текст] / А.В. Пряничников, В.В. Роеенко, Е.Б. Бондарев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2015.– № 4. – С. 7–12.

111. Решетников, А.В. Взрывное вскипание и полный развал струи перегретой воды [Текст] / Решетников А.В., Роеенко В.В., Мажейко Н.А., и др. // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 7. – С. 295–302.

112. Роеенко, В.В. Применение температурно-активированной воды для тушения пожаров турбинных масел на объектах теплоэнергетики [Электронный ресурс] / Роеенко В.В., А.В. Пряничников, Е.Б. Бондарев // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 4 (62). С. 84–93. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25846407>

113. Летников, Ф.А. Активированная вода [Текст] / Ф.А. Летников, Т.В. Кашеева, А.Ш. Минцис. – Новосибирск: Наука, 1976. – 136 с.

114. Скрипов, В.П. Метастабильная жидкость [Текст] / В.П. Скрипов. – М.: Наука, 1972. –312 с.

115. Скрипов, В.П. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии [Текст]: справочник / В.П. Скрипов, Е.Н. Синицин, П.А. Павлов и др. – М.: Атомиздат, 1980. – 208 с.

116. Ищенко, А.Д. Инновации в тушении пожаров энергетических установок и помещений судов (кораблей) [Текст] / А.Д. Ищенко, В.В. Роечко, И.Г. Малыгин, В.И. Комашинский // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – Т. 2.– № 2 (40). – С. 73–80.

117. Rasbash D. J. The extinction of fires by water sprays // Fire Res. Abstr. Rev. – 1962. —Vol. 4, No. 1,2. — P. 28-53.

118. Бондарь, В.А. Тушение пламени охлаждением поверхности горючих жидкостей [Текст] / В.А. Бондарь, В.И. Горшков // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – Т. 18 – № 8 – С. 56–61.

119. Мержанов, А.Г. Неизотермические методы в химической кинетике [Текст] / А.Г. Мержанов // Физика горения и взрыва. – 1973. – Т. 9. – № 1. – С. 4–36.

120. Навценя, В.Ю. Развитие научных основ и совершенствование методов обеспечения пожаровзрывобезопасности технологического оборудования с горючими газами и жидкостями [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / Навценя Владимир Юрьевич. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2003. – 572 с.

121. Азатян, В.В. Температурная зависимость скорости разветвлено-цепных процессов [Текст] / В.В. Азатян, А.А. Шавард // Изв. АН СССР. – 1977. Сер. хим. №11. – С. 2460–2464.

122. Тактическое руководство по тушению пожаров с применением технологии использования температурно-активированной воды: руководство / авт.-сост. В.В. Роечко, А.Д. Ищенко, Д.В. Киселев и др. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – 79 с.

123. Маслов, О.Н. Моделирование вероятностных распределений с «тяжелыми хвостами» [Текст] / О.Н. Маслов // Инфокоммуникационные технологии – 2011 – Т.9, № 1. – С. 8–15.

124. Золотарев, В.М. Современная теория суммирования независимых случайных величин [Текст] / В.М. Золотарев. – М.: Наука – 1986. – 416 с.

125. Учайкин, В.В. Метод дробных производных [Текст] / В.В. Учайкин. – Ульяновск, Артишок, 2008. – 512 с.
126. Маслов, О.Н. Устойчивые распределения и их применение в радиотехнике [Текст] / О.Н. Маслов. – М.: Радио и связь, 1994. – 152 с.
127. Чабдаров, Ш.М. Полигауссовы модели и спектры в посткорреляционных разделах статистической радиотехники [Текст] / Ш.М. Чабдаров, А.Ф. Надеев, Р.Р. Файзуллин и др. // Доклады IX МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». Казань, 2008 – С. 37–44.
128. Маслов, О.Н. Статистические характеристики коэффициента превышения в системе активной защиты информации [Текст] / О.Н. Маслов, А.С. Раков // ИКТ – 2009 – Т.7, №4. – С. 107–116.
129. Маслов, О.Н. Развитие математических принципов метода статистического имитационного моделирования [Текст] / О.Н. Маслов // Избранные труды Российской школы «К 70-летию Г.П. Вяткина». М.: РАН, 2005. – С. 539–550.
130. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов и средств измерений [Текст] / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
131. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
132. Маслов, О.Н. Моделирование плотностей распределения погрешностей измерений с помощью устойчивых законов [Текст] / О.Н. Маслов // Радиотехника. – 1998. – №7. – С. 6–9.
133. Левин, В.И. Интервальная математика и исследование систем в условиях неопределенности [Текст] / В.И. Левин // Пенза: Издательство Пензенского технологического института, 1998. – 55 с.
134. Левин В.И. Полиинтервалы, их исчисление и применение [Текст] / В.И. Левин // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 3. – С. 239–246.
135. Левин В.И. Многомерные интервалы и их применение в технике, экономике и социальной сфере [Текст] / В.И. Левин // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 4. – С. 110–116.

136. Левин В.И. Полиинтервалы в задачах оптимизации неопределенных систем [Текст] / В.И. Левин // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 1. – С. 49–59.

137. Безбородько, М.Д. Охрана труда пожарных. Современные требования. [Текст] / М.Д. Безбородько, А.А. Брежнев, А.С. Забиров [и др.]. – М.: Стройиздат, 1993. – 184 с.

138. Копылов, Н.П. Научные разработки в области обеспечения охраны труда, сокращения гибели и травматизма личного состава Государственной противопожарной службы при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ [Электронный ресурс] / Н.П. Копылов. Режим доступа: <http://www.0-1.ru/articles/showdoc.asp?dp=66> (дата обращения: 10.01.2012).

139. Матюшин, А.В. Оценка профессионального риска заболеваний и гибели пожарных [Текст] / А.В. Матюшин, А.А. Порошин, Е.В. Бобринев // Пожарная безопасность. 2005. – № 6. – С.68–74.

140. Порошин, А.А. Проблема интоксикации угарным газом сотрудников ГПС [Текст] / А.А. Порошин, С.П. Амельчугов, Ю.И. Савченков // Пожарная безопасность. 2001. – № 1. С.81–84.

141. Иличкин, В.С. Токсичность продуктов горения полимерных материалов [Текст] / В.С. Иличкин. – СПб.: Химия, 1993. – 131 с.

142. Колычева, И.В. Характеристика условий труда и оценка состояния здоровья пожарных [Текст] / И.В. Колычева, В.А. Панков, В.Б. Дорогова // Медицина труда и промэкология. 2003. С. 24–37.

143. Маркизова, Н.Ф. Токсические компоненты пожаров [Текст] / Н.Ф. Маркизова, А.Н. Гребенюк, В.А. Башарин. – СПб.: Фолиант, 2008. – 208 с.

144. Прозоровский, В. Берегись угарного газа [Текст] / В. Прозоровский // Наука и жизнь. 2011. – С.136–137.

145. Седов, А.В. Экспериментальное обоснование применения фармакологических препаратов для повышения устойчивости организма человека к сочетан-

ному воздействию оксида углерода и гипертермии [Текст] / А.В. Седов, Т.А. Лукачев, Н.А. Суровцев и др. // Медицина труда и промэкология. 1993. – № 9–10. – С. 10–11.

146. Тиунов, Л.А. Токсикология окиси углерода [Текст] / Л.А. Тиунов, В.В. Кустов. – М.: Медицина, 1980. – 285 с.

147. Бонитенко, Ю.Ю. Чрезвычайные ситуации химической природы [Текст] / Ю.Ю. Бонитенко, А.Н. Никифоров. – СПб.: Гиппократ, 2004. 426 с.

148. Коннова, Л.А. Эколого-токсикологический риск горения твердых бытовых отходов на свалках и помойках Санкт-Петербурга [Текст] / Л.А. Коннова, Л.Н. Панфилова // Проблемы управления риском в техносфере. 2011. № 3. С. 32–34.

149. Маршалл, В.В. Основные опасности химических производств [Текст] / В.В. Маршалл. – М.: Мир, 1989. – 672 с.

150. Профессиональная патология: национальное руководство [Текст] / под ред. Н.Ф. Измерова. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2011. – 784 с.

151. Молодкина, Н.Н. Проблемы профессионального риска и некоторые подходы к его оценке [Текст] / Н.Н. Молодкина, Т.Б. Попова, Г.К. Радионова // Медицина труда и промэкология. 1997. – № 9. – С.6–9.

152. Колесов, В.Г. Прогрессиентность токсической энцефалопатии у пожарных [Текст] / В.Г. Колесов, О.Л. Лахман, В.В. Бенеманский и др. // Медицина труда и промэкология. 2003. – № 3. – С.28–31.

153. Лахман, О.Л. Прогнозирование развития токсической энцефалопатии от воздействия комплекса химических веществ у пожарных [Текст] / О.Л. Лахман, Е.В. Катамандова, О.И. Шевченко // Медицина труда и промэкология. – 2008. – № 8. – С.12–16.

154. Городинский, С.М. К вопросу комплексной оценки физической работоспособности человека при использовании средств индивидуальной защиты. Пути совершенствования средств индивидуальной защиты работающих на производстве [Текст] / С.М. Городинский, Г.В. Бавро и др. // М., 1973. – С.25–32.

155. Ищенко А.Д. Увеличение удельного времени защитного действия дыхательных аппаратов для пожарной охраны [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Ищенко Андрей Дмитриевич – М.: МИПБ МВД РФ, 1998. – 191 с.
156. Чиркунов, В.Н. О физиологическом напряжении пожарных, работающих в средствах индивидуальной защиты Проблемы повышения эффективности пожарной техники [Текст] / В.Н. Чиркунов, А.В. Галкин, В.А. Петулько // Сб. науч. тр. М., 1988. С. 93–97.
157. Горенков, Р.В. Обзор журнала «Amer. J. of Industrial Medicine» [Текст] / Р.В. Горенков // Медицина труда и промэкология. – 1993. – № 1. – С.7–9.
158. Перечень веществ, продуктов, производственных процессов, бытовых и природных факторов, канцерогенных для человека. ГН 1.1.029-95 // М. – 1995.
159. Смулевич, В.Б. Производственные канцерогены и здоровье населения [Текст] / В.Б. Смулевич, Л.Г. Соленова // Гигиена и санитария. – 1997. – № 4. – С. 22–25.
160. Сапа, Ю. Медицина и жизнь. Обзорение [Электронный ресурс] / Ю.Сапа. – Режим доступа: [http:// www.pereplet.ru/med/699.html](http://www.pereplet.ru/med/699.html) (дата обращения: 11.01.2012).
161. Федоров, Л.А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы [Текст] / Л.А. Федоров // М.: Наука, 1993. – 226 с.
162. Шелепчиков, А.А. История диоксинов [Электронный ресурс] / А.А. Шелепчиков. Режим доступа: <http://www.dioxin.ru/history.htm> (дата обращения: 12.01.12).
163. Фаустов С. А. Эргономический подход к выбору средств индивидуальной защиты органов дыхания (НИИОТ СПб). [Электронный ресурс] / С.А. Фаустов // Режим доступа: <http://www.niiot.ru/article/article20.htm>. (дата обращения: 7.03.2012).
164. Ищенко, А.Д. Комплексный подход к минимизации последствий токсического воздействия дыма на пожарных / А.Д. Ищенко, Л.А. Коннова // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2012. – № 1. С. 1–11.



165. Порошин, А.А. Анализ заболеваемости, травматизма, гибели, инвалидности и смертности личного состава подразделений МЧС России за 2010–2014 гг. / А.А. Порошин, В.В. Харин, Е.В. Бобринев, Т.А. Шавырина // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2015. – № 2. – С. 38–44.

166. Гибель на пожарах: статистика, анализ и основные показатели [Электронный ресурс] // Клуб пожарных и спасателей. Режим доступа: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/gibel-na-pozharax> (дата обращения 20.05.2017)

167. Ищенко, А.Д. Методика оценки готовности подразделений частной, добровольной, ведомственной и муниципальной пожарной охраны к тушению пожаров / А.Д. Ищенко, П.В. Ширинкин // Актуальные проблемы защиты населения и территорий от пожаров и катастроф. Материалы Междунар. науч.-практ. конф. С.Петербург, 21 июня 2006 г. - СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, 2006

168. Кошечев, В.С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека в условиях высоких температур. / В.С. Кошечев, Е.И. Кузнец. – М.: Медицина. – 1986. – 256 с.

169. Ищенко, А. Д. Комплексный подход к оценке функционального состояния газодымозащитников в процессе тренировочных занятий / Ищенко А.Д., Шупнев Д.С. // Материалы второй международной научно-практической конференции «Проблемы обеспечения пожарной безопасности Северо-Западного региона» Санкт-Петербург, СПб университет МВД России, 2001. – С. 78–82.

170. Карпекин, В.В. Метод оценки эффективности противотепловых средств индивидуальной защиты по комплексным физиологическим критериям / Карпекин В.В., Исакин А.Ф., Костюкова В.И. // Гигиена труда: Республ. межвед. сб. – Киев: Здоровье, 1988. – Вып. 24. – С. 16–18.

171. Кузнец, Е. И. Заушная температура как один из основных показателей оперативного контроля теплового состояния человека. Медико-технические проблемы индивидуальной защиты человека. / Кузнец Е. И., Малкиман И. И., Михайлова Л. И. и др. // Теория и практика совершенствования индивидуальной защиты

работающих в неблагоприятных условиях. Сб. науч. трудов. – М. – 1989. – С. 122–126.

172. Лях, Г.Д. Физиологические механизмы адаптации металлургов к воздействию повышенного конвекционного и сочетанного лучистого и конвекционного тепла // Гигиена труда и профессиональные заболевания. – 1992. – № 11–12. – С. 10–14.

173. Takashi Segawa. Tokyo brigade reveals detail of its revolutionary cooling fire coat // Fire. – January, 1994. – Vol. 86. - №.1063. - p.18], [Richard Peace. Thermal comfort - the essential equilibrium // Fire. – October, 1995. – Vol. 88. - № 1084. – p. 37–43.

174. Коннова, Л.А. Метод повышения тепловой устойчивости пожарных / Л.А.Коннова, А.Д.Ищенко, Д.С.Шупнев // Пожаровзрывобезопасность. – 2000. – № 4. – С. 5.

175. Смирнов, К.М. Руководство по физиологии дыхания [Текст] / К.М. Смирнов.– М., 1983 – 409 с.

176. Каминский, С.Л. Средства индивидуальной защиты: справ.изд. [Текст] / С.Л. Каминский, К.М. Смирнов, В.И. Жуков, Н.А. Краснощеков. Л.: Химия, 1989. – 400 с.

177. Климушин, Н.Т. Тушение пожаров в зданиях повышенной этажности [Текст] / Н.Т. Климушин, В.М. Конов // М.: Стройиздат. – 1983. – 63 с.

178. Карпекин, В.В. Оценка регенеративных респираторов по комплексному показателю энергетической эргономики [Текст] / В.В. Карпекин, Н.С. Диденко, Кулешова Т.Ю. // В кн.: Способы и средства ведения горноспасательных работ и предупреждения аварий в шахтах. – Донецк: 1979. – Вып.16. – С. 25–29.

179. Диденко, Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ. 2-е издание, переработанное и дополненное [Текст] / Н.С. Диденко // М.: Недра,1990. – 160 с.

180. Смирнов С.Л. Специально направленная физическая подготовка пожарных для работы в дыхательных аппаратах [Текст]: автореф. дис. ... канд. пед. наук. – СПб.: ВПТШ МВД РФ, 1994. – 24 с.

181. Эргономика: Учебник [Текст] / Под редакцией Крылова А.А., Суходольского Г.В. – Л.: Издательство ЛГУ, 1988. – 104 с.
182. Байков, А.Ю. Исследование времени работы газодымозащитников на пожарах [Текст] / А.Ю. Байков, Н.И. Простов, В.Н. Чиркунов // Сборник научных трудов – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1979. – С.217-218.
183. Батчер, Е. Опасность дыма и дымозащита [Текст] / Е. Батчер, А. Парнелл // Пер. с англ. Е.Ш.Фельдмана; Под ред. В.М.Есина. – М.: Стройиздат, 1983.– 152 с.
184. Безбородько, М.Д. К обоснованию срока защитного действия изолирующих противогазов [Текст] / М.Д. Безбородько, А.Ю. Байков // Пожарная техника и тактика тушения пожаров: Сборник научных трудов – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984.– С. 3–6.
185. Зима, А.П. Определение научно обоснованных нормативов потребления кислорода и воздуха подразделениями ГДЗС при работе в противогазах [Текст] / А.П. Зима, В.В. Столяров, Н.М. Зубков, А.В. Гитцович // Пожарная безопасность: история, состояние, перспективы: Материалы 14-й Всероссийской научно-практической конференции. - М.: ВНИИПО МВД РФ. 1997 – С.175–177.
186. Маслов, Ю.Н. Создание дыхательных аппаратов со сжатым воздухом для пожарных [Текст] / Ю.Н. Маслов // Пожарная безопасность: история, состояние, перспективы: Материалы 14-й Всероссийской научно-практической конференции. – М.: ВНИИПО МВД РФ. 1997 – С. 136–138.
187. Чиркунов, В.Н. Аналитическое обоснование запаса сжатого воздуха в дыхательных аппаратах [Текст] / В.Н. Чиркунов, Н.И. Простов // Пожарная техника: Сборник научных трудов ВНИИПО – М., 1983. С. 45–49.
188. Warkander DE, Lundgren CEG. Dead space in breathing apparatus, interaction with ventilation / Undersea Biomed Res - 1993.- 16, P.456-470.
189. Warkander DE, Norfleet WT, Nagasawa GK, Lundgren CEG. CO<sub>2</sub> retention with minimal symptoms but severe dysfunction during wet simulated dives to 6.8 atm abs./ Undersea Biomed Res – 1990. – 17, P. 515–523.

190. Руководство по специальной обработке в подразделениях Текст] // М.: Воениздат, 1989.

191. Способ получения дыхательной смеси: пат. 2297258 Рос. Федерация: МПК А62В 7/08 / Боряев А.А.; заявитель и патентообладатели Боряев А.А. – 2005128992/12; заявл. 20.03.2014

192. Способ получения дыхательной смеси: пат. 2509582 Рос. Федерация: МПК А62В 7/08 / Боряев А.А.; заявитель и патентообладатели Боряев А.А. – 2509582; заявл. 07.09.2005

193. Warkander DE. Ergonomics of Breathing Apparatus, with Special Reference to Work of Breathing, Dead Space and Breathing Resistance / Chalmers University of Technology - 1994. - 98 p.

194. ГОСТ 949-73\*. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на  $P_p \leq 19,6$  МПа (200 кгс/см<sup>2</sup>). Технические условия [Электронный ресурс]: ГОСТ 949-73\*. (введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 19.12.1973 № 2717) (ред. от 01.06.1986) // Консорциум: электронный фонд нормативно-правовой документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001921> (дата обращения 15.12.2019)

195. Емкость из композиционного материала: пат. Рос. Федерация: МПК7 F17C1/00, F16J12/00 / Соколовский М.И., Каримов В.З., Кремлев А.Н., Нельзин Ю.Б.; заявитель Соколовский М.И. – №2007658; заявл. 07.08.2002; опубл. 27.02.2004.

196. Изолирующий дыхательный аппарат: пат. Рос. Федерация: МПК А62В7/04/ Апрельский Е.Н., Гузанов М.А., Ермаков С.В., Максимов А.Г.; заявитель Апрельский Е.Н. – №2164162; заявл. 24.11.1999; опубл. 20.03.2001

197. Способ компоновки изолирующего дыхательного аппарата с открытой схемой дыхания: пат. Рос. Федерация: МПК А62В7/02 / Ищенко А.Д., Черепанов М.Г.; заявитель Ищенко А.Д. – №2307688; опубл. 10.10.2007

198. Дыхательные аппараты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ivares.spb.ru/cat-da.html> (Дата обращения 14.10.2016)

199. Клещун, П.П. Теоретический анализ и расчет систем кислородопитания респираторов. – В кн. Материалы к конструированию и испытанию защитных дыхательных приборов. – М.:1965. – С. 43–70.
200. Байков, А.Ю. Определение уровня качества кислородных и воздушных баллонных дыхательных аппаратов [Текст] / А.Ю. Байков, М.Д. Безбородько // Противопожарная техника и безопасность: Сборник научных трудов ВИПТШ МВД СССР. – М.: 1978. – С.174–182.
201. Шик, Л.Л. Биомеханика дыхания [Текст] / Л.Л. Шик // Физиология движения: Руководство по физиологии. Л.: Наука, 1975. – С. 11–43.
202. Гинзбург, Т. Дыхательные психотехники. Методология интеграции / Т. Гинзбург. – М.: Психотерапия, 2013. – 144 с.
203. Глубокое дыхание. Метод К.П. Бутейко. – М.: Луч. – 2004. – 124 с.
204. Травников, А. Дыхательно-энергетический тренинг по системе спецназа КГБ / А. Травников. – М.: Феникс, 2006. – 240 с.
205. Рассел, Дж. Дыхательная система человека / Дж. Рассел. – М.: VSD, 2012. – 179 с.
206. Малахов Г. Лечебное дыхание. Практический опыт. – Спб.: Невский проспект. – 2006. – 242 с.
207. Амосова, Т.Ю. Дыхательная гимнастика по Стрельниковой [Текст] / Т.Ю. Амосова. - М.: Книга по Требованию, 2010. – 197 с.
208. Оздоровительные дыхательные системы. – М.: АСТ, Сталкер, 2008. – 192 с.
209. Краткий пересказ и изложение взглядов систем исцеления дыхания по методике К. П. Бутейко и А. Н. Стрельниковой. Дыхательная гимнастика. – М.: АСТ, 2005. – 382 с.
210. Батюшев, В.М. Комплексная оценка готовности газодымозащитников к работе в дыхательных аппаратах / В.М. Батюшев, А.Д. Ищенко, Г.В. Талалаева, К.В. Легенький // Технологии техносферной безопасности. 2017. – вып. 2 (72) [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_29871145\\_51455209.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29871145_51455209.pdf)

211. Пожарный автомобиль-база газодымозащитной службы АБГ 3 (4308) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.peleng.info/product/abg-kamaz> (Дата обращения 12.03.2018).

212. УКС-400В-131 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ural-bt.ru/produksiya/kompressoryi/peredvijnyie\\_dizelnyie\\_kompressoryi/kompressoryi\\_uks/uks\\_400v\\_131](https://ural-bt.ru/produksiya/kompressoryi/peredvijnyie_dizelnyie_kompressoryi/kompressoryi_uks/uks_400v_131) (Дата обращения 12.03.2018).

213. Басманов, П.И. Средства индивидуальной защиты органов дыхания [Текст] / П.И. Басманов, С.Л. Каминский, А.В. Коробейникова, М.Е. Трубицына // – СПб.: ГИПП «Искусство России», 2002. – 400 с.

214. Федеральный закон Российской Федерации от 21.12.1994 № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» (ред. от 28.05.2017). [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_5438/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5438/) (дата обращения: 12.04.2018).

215. Ищенко, А.Д. Нормативно-правовая основа жизнеобеспечения человека при пожаре [Электронный ресурс]// Технологии техносферной безопасности. – 2015. – Вып.6 (64). – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-6/35-06-15.ttb.pdf>

216. Постановление Правительства РФ от 25.04.2012 № 390 (ред. от 30.12.2017) «О противопожарном режиме» (вместе с «Правилами противопожарного режима в Российской Федерации») // КонсультантПлюс. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_129263/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129263/) (дата обращения: 14.09.2017).

217. Ищенко, А.Д. Проблемы обеспечения тушения пожаров на объектах энергетики оперативными подразделениями пожарной охраны // Пожаровзрывобезопасность. 2016. – №5 (28). – С. 26–36.

218. Развитие пожаров в машинных залах [Электронный ресурс]// Хелпикс.Орг [сайт]. Режим доступа: <http://helpiks.org/4-3142.html> (дата обращения 02.02.2018).

219. Из-за пожара на Василеостровский ТЭЦ электричество отключать не пришлось [Электронный ресурс] // Комсомольская правда. Новосибирск [сайт]. Режим доступа: <https://www.nsk.kp.ru/daily/26467.5/3337752/> (дата обращения 05.02.2018).

220. Об утверждении и введении в действие федеральных норм и правил в области использования атомной энергии. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07 [Электронный ресурс]: постановление Ростехнадзора от 10.12.2007 № 4 (Зарегистрировано в Минюсте РФ 21.01.2008 № 10951) // Консорциум: электронный фонд нормативно-правовой документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902083695> (дата обращения 15.12.2019)

221. Житарев, В.Е. Вопросы атомной науки и техники / В. Е. Житарев, В. М. Качанов, Г. В. Лебедев, А. Ю. Сергевнин. // Физика ядерных реакторов. – Вып. 4. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 2013. – 46 с.

222. Сидоров, М.Ю. Исследование режимов работы реакторных установок РБМК-1000 в подкритическом состоянии [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.14.03 / Сидоров Михаил Юрьевич – Санкт-Петербург, 2003. – 185 с.

223. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [Электронный ресурс]: Межгосударственный стандарт. ГОСТ 12.1.005-88 (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 29.09.1988 № 3388) (ред. от 20.06.2000) // Консорциум: электронный фонд нормативно-правовой документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200003608> (дата обращения 15.12.2019)

224. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление [Текст]. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.

225. Фогилев, И.С. Моделирование действий оперативного персонала атомной электростанции в условиях развития опасных факторов пожара [Текст] / И.С. Фогилев, А.Д. Ищенко// Пожары и чрезвычайные ситуации, предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 1. – С. 20–27. DOI: 10.25257/FE.2018.1.20-27

226. Ищенко, А.Д. Применение интервального анализа к оценке временных характеристик действий оперативного персонала атомных электростанций [Электронный ресурс] / А.Д. Ищенко, И.С. Фогилев // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 6. Режим доступа: <http://academygps.ru/1312/> (дата обращения 07.08.2017).

227. Tanaka H., Takaoka S. Lighting effects in smoke tunnel fire [Текст]. Quart. Repts. Railway Technical Research Institute, 1974, vol. 15, no. 2, p. 83.

228. Определение пределов видимости в задымленной шахтной атмосфере [Текст] / Дендюк М.В., Далькевич В.М., Зикун Г.А., Петров П.П // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. ВНИИ горнодобывающей промышленности. – Донецк, 1973. – С. 62–66.

229. Malhotra M.L. Movement of smoke on escape routes, instrumentation and effect of smoke on visibility [Электронный ресурс]. Fire Research Note, no. 651, 652, 653, 1967. Режим доступа: [http://iafss.org/publications/frn/651/-1/view/frn\\_651.pdf](http://iafss.org/publications/frn/651/-1/view/frn_651.pdf) (дата обращения 11.11.2016)

230. Rasbash D.J. Efficiency of hard lamp in smoke [Текст]. The Institution of Fire Engineers Quarterly, 1951, vol. 11, pp. 46–59.

231. Mecuire J.H., Tamura G.T. Wilson A.G. Smoke movement in high-rise buildings [Электронный ресурс]. Ottawa, National Research Council of Canada, 1971. 139 Режим доступа: <http://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/accepted/?id=af1afd4c-f8d6-4daf8d2b-0aea9bf0089e> (дата обращения 30.11.2016).

232. Wakamatsu T. Calculation of smoke movement in buildings: Second Report [Текст]. Japan Building Research Institute; March 1971, Research Paper no. 46, pp. 501–518.

233. Visibility in the fire smoke [Текст]. Journal of the illuminating engineering institute of Japan, 1975, vol. 59, no. 2, pp. 76–82.

234. Jin T. Visibility through fire smoke [Текст]. Fire and Flammability, 1978, vol. 9, no. 2, pp. 135–143.

235. Florschuts P. Beitrag zur Bewentung der Jefahren durch Rauch [Текст]. Nehorlav polymer mater. Bratislava, 1980, 2, S. 87–103.

236. Wood P.G. Behaviour of people in fires [Текст]. Fire, 1973, vol. 65, no. 814. 114 p.

237. Jin Tadahisa. Studies of emotional instability in smoke from fires [Текст]. Fire and Flammability, 1981, vol. 12, no. 2, pp. 130–142.



238. Зотов, Ю.С. Процесс задымления помещений при пожаре и разработка метода расчета необходимого времени эвакуации людей [Текст]: дис. ...канд. тех. наук: 05.26.03 / Зотов Юрий Сергеевич. – М.: Высшая инженерная пожаротехническая школа, 1989. – 150 с.

239. Чистяков, И.М. Влияние снижения видимости на пожаре на работу звеньев ГДЗС [Текст] / И.М. Чистяков, В.В. Кичайкин, И.А. Краснов, Д.П. Погожин // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2016 – № 1. – С. 346–347.

240. Коршунов, И.В. О поисково-спасательных работах звена газодымозащитной службы [Электронный ресурс] / И.В. Коршунов, А.В. Смагин, Ю.И. Панков, Д.В. Андреев // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – Выпуск 4 (68). – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/18-04-16.ttb.pdf> (Дата обращения 15.12.2016 г.).

241. Seader, J.D. Physical aspects of smoke development in an NBS smoke density chamber [Текст] / J.D. Seader, W.P. Chien. Fire and Flammability, 1975, vol. 6, pp. 296–310.

242. Соковнин А.И. Осаждение дыма при тушении пожаров на объектах энергетики [Текст]: дис. ...канд. тех. наук: 05.26.03 / Соковнин Артем Игоревич. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – 140 с.

243. Фогилев И.С. Организация тренировок оперативного персонала атомных электростанций в дыхательных аппаратах со сжатым воздухом [Текст] / А.Д. Ищенко, М.А. Шурыгин // Материалы V международной научно-практической конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2016». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 48–52.

244. Фогилев И.С. Особенности проведения тренировок оперативного персонала атомных электростанций в дыхательных аппаратах со сжатым воздухом [Текст] / М.А. Шурыгин // Материалы V международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 122–222.

245. О введении в действие методических рекомендаций по организации тренировок личного состава объектовых подразделений ФПС по охране АЭС и опе-

ративного персонала АЭС, в том числе совместных, на базе огневых учебнотренировочных комплексов (полигонов), эксплуатируемых на АЭС. МР 1.3.2.09.1026–2015 (от 05.10.2015 № 9/1103-П). – М.: Росэнергоатом, 2015. – Неопубл. документ.

246. Об утверждении Порядка подготовки личного состава пожарной охраны [Электронный ресурс]: приказ МЧС России 472 от 26.10.2017 г. (рег. номер 50008 от 12.02.2018) // Система Гарант. – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71733062/> (дата обращения 15.01.2020)

247. Методические рекомендации по организации и проведению занятий с личным составом ГДЗС ФПС МЧС России, утвержденные Главным военным экспертом МЧС России П.В. Платом 30.06.2008 г.

248. АО ПТС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ptop-pts.ru/disquision/311.html> (Дата обращения 20.01.2018 г.)

249. АО ПТС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ptop-pts.ru/disquision/129.html> (Дата обращения 20.01.2018 г.)

250. Шурыгин, М.А. К вопросу о готовности личного состава местных пожарно-спасательных гарнизонов к работе в непригодной для дыхания среде / М.В. Бондаренко, А.В. Харитонов // Материалы VI-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017.

251. Шурыгин, М. А. К вопросу оптимизации подготовки местных пожарно-спасательных гарнизонов к работе в непригодной для дыхания среде / А.И. Ньюганен, А.Д. Ищенко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 3. – С. 72–78. DOI: 10.25257/FE.2018.3.72-78

252. Антонникова, А.А. Осаждение аэрозолей с помощью акустического излучения и дополнительной дисперсной фазы [Текст]: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Антонникова Александра Александровна. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2014. – 114 с.

253. Пискунов, В.Н. Теоретические модели кинетики формирования аэрозолей [Текст] / В.Н. Пискунов: монография. – Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. – 209 с.

254. Сорокин, А.А. Теоретические модели образования, эволюции и осаждения аэрозолей в элементах реакторной установки АЭС [Текст] / А.А. Сорокин,

Л.И. Зайчик, В.Ф. Стрижов, С.В. Цаун // в сб. *Фундаментальные проблемы моделирования турбулентных течений*. – 2010. – Т.1, Теория и эксперимент. – М.: Наука, 2010. – С.185–263.

255. Фукс, Н.А. *Механика аэрозолей* [Текст] / Н.А. Фукс. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. – 351 с.

256. Тимофеев, М.П. *Испарение мелких капель воды* [Текст] / М.П. Тимофеев, М.Е. Швец // *Методология и гидрология*. – 1948. – № 2. – С. 9–19.

257. Френкель, Я.И. *Собрание избранных трудов. Том 3.* [Текст] / Я.И. Френкель. – Л.: Издательство АН СССР, 1959.

258. Reiss H. The replacement free energy in nucleation theory // *Adv. Colloid Interface Sci.* 1977. V. 7. P. 1–66.

259. Reiss H., Kegel W.K., Katz J.L. Role of the model dependent translational volume scale in the classical theory of nucleation // *J. Phys. Chem.* 1998. V. 102. P. 8548–8555.

260. Fletcher N.H. Size effect in heterogeneous nucleation // *J. Chem. Phys.* 1958. V. 29. № 23. P. 572–576.

261. Hamill P., Turco R.P., Kiang C.S., Toon O.B., Whitten R.C. An analysis of various nucleation mechanisms for sulfate particles in the stratosphere // *J. Aerosol Sci.* 1982. V. 13. № 6. P. 561–585.

262. Fletcher N.H. Size effect in heterogeneous nucleation // *J. Chem. Phys.* 1958. V. 29. № 23. P. 572–576.

263. Матвеев, Л.Т. *Основы общей метеорологии. Физика атмосферы* [Текст] / Л.Т. Матвеев. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 876 с.

264. Mordy W. Computations of the growth by condensation of a population of cloud droplets. *Tellus*, 11, №. 1, 1959.

265. Мазин, И.П. К теории формирования спектра размеров частиц в облаках и осадках [Текст] / И.П. Мазин // *Тр. ЦАО*, вып. 64, 1965.

266. *Физика облаков и активных воздействий: сборник трудов* [Текст] / под ред. В.Я. Никандрова, Н.С. Шишкина. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1968. – С. 202.

267. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей: монография [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 228 с.
268. Кулев, Д.В. Морфологические свойства дисперсной фазы дыма при горении полимерных материалов [Текст] // Д.В. Кулев, В.Л. Млынский, В.А. Марченко // Безопасность людей при пожарах: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1984. – С. 100–107.
269. Кулев, Д.Х. Опасность продуктов горения полимерных материалов [Текст] / Обзорная информация. Сер. «Пожарная безопасность». – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1983. – 22 с.
270. Pistor M. Ein MeBsystem zur Bestimmung der Partikelgro-Benverteilung von Testbrandaerозолен: die Gesamthochschule [Текст]. Duisburg, 1978. P. 151
271. Erkenntnisse zur Einsatzstellendelüftung. Dredinski Mark. Brandschutz. 2014. 68, № 9, pp. 661-685
272. Есин, В.М. Исследование распространения продуктов горения по многоэтажным зданиям и сооружениям и противодымная защита [Текст]: дис. ... док. техн. наук: 05.26.01 / Есин Владимир Михайлович. – М.: Высшая инженерная пожарно-техническая школа, 1991. – 363 с.
273. Есин, В.М Сравнение методик расчета требуемых параметров вентиляционных систем противодымной защиты многоэтажных зданий [Текст] / В.М. Есин, С.П. Калмыков // Пожаровзрывобезопасность. – 2014 – Т. 23. – № 6. – С. 47–52.
274. Расчетное определение основных параметров противодымной вентиляции зданий: Методические рекомендации к СП 13130.2013 [Текст]. – М.: ВНИИПО, 2013. – 58 с.
275. Пузач, С.В. Условия возникновения «поддува» при работе систем дымоудаления с естественным побуждением [Текст] / Т.Т. До, С.В. Пузач // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 9. – С. 57–63.
276. Пузач, С.В. Влияние высоты стенки дымоудаляющего отверстия на возникновение «поддува» при дымоудалении с естественным побуждением [Текст] / Т.Т. До, С.В. Пузач // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 11. – С. 46–52.

277. Остах, С.В. Диспергирование жидкости интегрированными устройствами дымоподавления и пожаротушения [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Остах Сергей Владимирович. – М.: Московский институт пожарной безопасности МВД России, 1997. – 408 с.

278. Мыльников, И.К. Разработка технических требований к системам подавления дыма в помещениях и на путях эвакуации при пожаре [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Мыльников Игорь Константинович. – М.: УГПС МВД России, 2000. – 137 с.

279. Пат. 1316687 СССР, МПК А 62 С 1/00, В 01 D47/00. Способ осаждения дыма [Текст] / Д.Х. Кулев, В.П. Чижиков (СССР). – 3851886/40-12; заявлено 08.02.85; опубл. 15.06.87. Бюл. 22. – С. 3.

280. Руководство по тушению пожаров импульсными и малорасходными системами [Текст]. – М.: ВНИИПО, 2004. – 6 с.

281. Богомаз, А.М. Влияние воздушно-водяной смеси на температуру в помещении [Текст] / А.М. Богомаз, И.Ф. Дикенштейн // Научный вестник НИГД «Респиратор». – 2016 – № 3(53). – С. 23–35.

282. Степанов, В.П. Минимизация задымленности в строительных объемах зданий и сооружений методами конденсационного улавливания и диспергирования электрофизически модифицированной воды [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Степанов Владимир Павлович. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2007. – 133 с.

283. Способ осаждения дыма: пат. 2069576 Рос. Федерация: МПК А62С2/00 / М.Н. Акимов, В.С. Звонов; С.В. Остах; заявитель и патентообладатели М.Н. Акимов, В.С. Звонов; С.В. Остах. – № 5064421/12; заявл. 05.10.1992; опуб. 27.11.1996, Бюл. № 27 (II ч.). – 3 с.

284. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие жаростойкие и жаропрочные. Марки [Электронный ресурс]: Государственный стандарт Союза ССР. ГОСТ 5632-72 (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 27.12.1972

№ 2340) (ред. от 01.11.2001) // Консорциум: электронный фонд нормативно-правовой документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001716> (дата обращения 15.12.2019)

285. Бензины автомобильные. Технические условия [Электронный ресурс]: Межгосударственный стандарт. ГОСТ 2084-77 (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 29.09.1977 № 2344) (ред. от 01.01.2002) // Консорциум: электронный фонд нормативно-правовой документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001366> (дата обращения 15.12.2019)

286. Малыгин, И.Г. Пожарная тактика. Курс лекций Часть 3 [Текст] / И.Г. Малыгин, А.А. Скопцов, П.В. Ширинкин // СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, 2008.

287. Матюшин, А.В. Анализ методических подходов к оценке деятельности органов управления и подразделений ГПС МЧС России [Текст] / А.В. Матюшин, А.А. Порошин, А.А. Новиков, В.В. Харин // М.: Пожарная безопасность, 2004 – № 3. С. 71–75.

288. Специализированные подразделения пожарной охраны: монография [Текст]/ Ш.Ш. Дагиров, М.В. Алешков, А.Д. Ищенко и др. // – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – 173 с.

289. Порошин, А.А. Анализ пожарной безопасности, ресурсной обеспеченности ГПС и социально-экономического развития Пермской области / А.А. Порошин, В.С. Путин // Материалы II международной научно-практической конференции МЧС «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация», 4.2. – Минск: 2003.

290. Лупанов, С.А. Состояние ресурсной обеспеченности ГПС [Текст]/ С. А. Лупанов, А.Г. Фирсов, М.М. Майоров, В.И. Сибирко, В.С. Путин // Пожарная безопасность. – 2003. – № 2. – С. 142–148.

291. Ищенко, А.Д., Соковнин, А.И., Программа по оценке достаточности сил и средств тушения пожара. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 26.09.2018 г. № 2018662062.

**Приложение А**

**Акты внедрения**

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника СПБИПБ МВД РФ  
по научной работе  
полковник в отставке

"23"  
Танклевский  
1998 года




## А К Т

**по использованию результатов диссертационного исследования  
в учебном процессе**

Ознакомившись с содержанием диссертационной работы комиссия в составе: начальника кафедры пожарной тактики Лемишка И.С., профессора, д.м.н. кафедры безопасности жизнедеятельности ГПС Конновой Л.А. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования в области увеличения времени защитного действия дыхательных аппаратов, полученные адъюнктом МИПБ МВД РФ Ищенко А.Д., могут использоваться в курсе "Подготовка газодымозащитника", а также в дипломном проектировании на кафедре пожарной тактики.

Начальник кафедры пожарной тактики

 И.С. Лемишка

Профессор кафедры безопасности  
жизнедеятельности ГПС



Л.А. Коннова

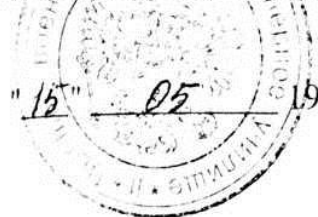


"УТВЕРЖДАЮ"

Заместитель начальника ВВМИУ по

учебной и научной работе

канд. техн. наук, профессор



Д.Д. Мартынов

### А К Т

внедрения практических рекомендаций диссертационной работы Ищенко Андрея Дмитриевича на соискание ученой степени кандидат технических наук на тему: «Увеличение удельного времени защитного действия дыхательных аппаратов».

Разработанный в диссертации Ищенко А.Д. способ увеличения времени работы в дыхательных аппаратах нашел широкое применение в учебном процессе, при проведении тренировок с курсантами по тушению пожаров и отработке действий личного состава аварийных партий при проведении разведки в условиях сильной задымленности, позволяя более полно использовать отведенное для этого учебное время. Отрицательных эффектов при использовании камер, увеличивающих объем подмасочного пространства не отмечалось.

Начальник кафедры УЖК

профессор кафедры УЖК

канд. техн. наук, доцент

Н.В. Казакевич

С.С. Попов

“Утверждаю”  
 Начальник МИПБ МВД России  
 генерал-майор внутренней службы  
 Е. Е. Кирюханцев  
 “ мая 1998 года

**А К Т**

**внедрения результатов диссертационного исследования**

Комиссия в составе: заместителя начальника МИПБ МВД России полковника внутренней службы Грашичева Н.К., начальника кафедры пожарной техники полковника внутренней службы Назарова В.П., заместителя начальника кафедры пожарной техники полковника внутренней службы Ульянова Н.И. констатирует, что в учебный процесс факультета руководящих кадров внедрены научные разработки соискателя кафедры пожарной техники капитана внутренней службы Ищенко А.Д. (научный руководитель - к.т.н., доцент, полковник внутренней службы Роевко В.В.), которые используются следующим образом:

1. Программа “Методика расчета эргономических параметров дыхательных аппаратов по удельному времени защитного действия” - для экспресс-оценки, при помощи персонального компьютера, функциональной пригодности различных моделей дыхательных аппаратов для тушения пожаров.

2. Лекция «Способы увеличения удельного времени защитного действия дыхательных аппаратов» - для ознакомления слушателей с современными средствами защиты органов дыхания, основными проблемами их эксплуатации и основными способами совершенствования средств индивидуальной защиты органов дыхания.

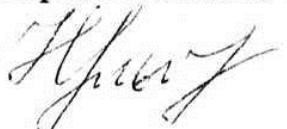
Заместитель начальника МИПБ МВД России  
 по учебной работе  
 полковник внутренней службы

 Н. К. Грашичев

Начальник кафедры пожарной техники  
 МИПБ МВД России  
 полковник внутренней службы

 В.П. Назаров

Заместитель начальника кафедры пожарной техники  
 МИПБ МВД России  
 полковник внутренней службы

 Н.И. Ульянов



«Утверждаю»

Начальник ГУГПС МВД России  
генерал-майор внутренней службы  
Е.А. Серебrenников  
» мая 1998 года

А К Т

### внедрения результатов диссертационного исследования

Комиссия в составе: начальника отдела пожарной техники и вооружения ГУГПС МВД России полковника внутренней службы Жук А.И., уполномоченного ГУГПС МВД России подполковника внутренней службы Игнатъева Д.П., старшего инспектора отдела пожарной техники и вооружения ГУГПС МВД России майора внутренней службы Рыбкина И.В. констатирует, что отделом пожарной техники и вооружения ГУГПС могут быть использованы в практической деятельности следующие научные разработки соискателя кафедры пожарной техники Московского института пожарной безопасности МВД России капитана внутренней службы Ищенко А.Д. (научный руководитель - к.т.н., доцент, полковник внутренней службы Роеvко В.В.):

1. Программа «Методика расчета эргономических параметров дыхательных аппаратов по удельному времени защитного действия» - для экспресс-оценки при помощи персонального компьютера функциональной пригодности различных моделей дыхательных аппаратов для тушения пожаров, определения количественного влияния факторов, оказывающих воздействие на работающего в аппарате и на выполнение основной задачи.

2. Способ увеличения удельного времени защитного действия дыхательных аппаратов - для моделирования вариантов его применения и разработки устройств, позволяющих этот способ реализовать на практике.

Использование данных научных разработок позволяет:

1. Оценивать влияние, которое оказывает дыхательный аппарат на работающего, выбирать преобладающий фактор и проводить сравнительный анализ нескольких моделей аппаратов, что необходимо при оснащении средствами защиты органов дыхания, а также в выборе направлений и способов их совершенствования.

2. Разработать устройства, применение которых позволит снизить массу дыхательного аппарата на 18-20 %, не снижая времени защитного действия, а, следовательно, общие энергозатраты газодымозащитника на 4-7 %. Возможно решение обратной задачи - не снижая массы аппарата, повысить время защитного действия на такую же величину. Кроме того, при реализации данного способа снизится нагрузка на компрессорное оборудование, заправляющее дыхательные аппараты.


Начальник отдела пожарной техники и вооружения  
ГУГПС МВД России  
полковник внутренней службы

 А.И. Жук

Уполномоченный ГУГПС МВД России  
подполковник внутренней службы

 Д.П. Игнатъев

Старший инспектор отдела  
пожарной техники и вооружения ГУГПС МВД России  
майор внутренней службы

 И.В. Рыбкин



УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер Смоленской АЭС

А.Ю. Лещенко

2018 г.

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук, профессора Академии ГПС МЧС России кандидата технических наук Ищенко Андрея Дмитриевича на тему:  
«Организация тушения пожаров объектов энергетики»  
в процесс подготовки оперативного персонала Смоленской АЭС к действиям при возникновении пожара

Комиссия в составе:

Первого заместителя Главного инженера станции Скирды Вадима Юрьевича, заместителя главного инженера - начальника учебно-тренировочного подразделения Савиных Бориса Геннадьевича, начальника отдела пожарной Шведова Владимира Владимировича подтверждает, что результаты диссертационного исследования Ищенко Андрея Дмитриевича используются в процессе подготовки оперативного персонала Смоленской АЭС к действиям при возникновении пожара, в учебно-методических материалах по обучению оперативного персонала Смоленской АЭС, в части определения условий видимости при работе в непригодной для дыхания в среде, а передвижной комплект технических средств обеспечения работ оперативного персонала АЭС при пожаре проходит опытную эксплуатацию.

**Комиссия:**

Первый заместитель Главного инженера станции

В.Ю. Скирда

Заместитель главного инженера –  
начальник учебно-тренировочного подразделения

Б.Г. Савиных

Начальник отдела пожарной безопасности

В.В. Шведов



УТВЕРЖДАЮ  
 Генеральный директор  
 АО «ЛТЭС»



С.В. Хан

12 2019 года

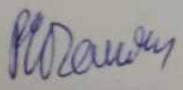
### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук, профессора АГПС МЧС России кандидата технических наук Ищенко Андрея Дмитриевича на тему «Организация тушения пожаров объектов энергетики» в процесс разработки новых средств защиты пожарных


Комиссия в составе: первый заместитель генерального директора - Главный конструктор Е.А. Альбац, заместитель генерального директора по качеству Р.В. Андреев, главный инженер А.В. Стефанов подтверждает, что результаты диссертационного исследования Ищенко Андрея Дмитриевича используются в разработке новых технических решений технических, направленных на увеличение времени защитного действия средств индивидуальной защиты органов дыхания пожарных.

Комиссия:


Первый заместитель генерального директора –  
 Главный конструктор

 / Е.А. Альбац

Заместитель генерального директора  
 по качеству

 Р.В. Андреев

Главный инженер

 А.В. Стефанов

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии  
ГПС МЧС России по учебной работе  
канд. воен. наук, доцент

М.В. Бедило

« 21 » \_\_\_\_\_ 2020 г.

## АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук профессора Академии ГПС МЧС России кандидата технических наук Ищенко Андрея Дмитриевича в учебный процесс Академии Государственной противопожарной службы МЧС России

Комиссия в составе:

Начальника учебно-методического центра полковника внутренней службы, канд. ист. наук Шныпко В.С., начальника учебно-научного комплекса пожаротушения полковника внутренней службы, канд. техн. наук, доцента Шкунова С.А., начальника кафедры пожарно-строевой и газодымозащитной подготовки в составе учебно-научного комплекса пожаротушения полковника внутренней службы, канд. техн. наук Коршунова И.В. подтверждает, что результаты диссертационного исследования Ищенко Андрея Дмитриевича в части развития теоретических основ локализации пожаров в зданиях объектов энергетики, определения достаточности сил и средств для локализации пожаров в зданиях объектов энергетики, а также моделирования способов и совершенствования средств защиты участников тушения от опасных факторов пожара, совершенствования подготовки к тушению пожаров в условиях задымления используются при преподавании дисциплин «Пожарная тактика», «Подготовка газодымозащитника», «Организация и координация деятельности пожарно-спасательных гарнизонов».

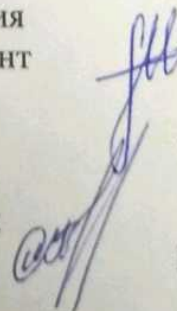
Комиссия:

Начальник учебно-методического центра  
полковник внутренней службы, канд. ист. наук



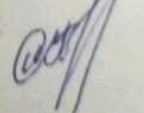
В.С. Шныпко

Начальник учебно-научного комплекса пожаротушения  
полковник внутренней службы, канд. техн. наук, доцент



С.А. Шкунов

Начальник кафедры пожарно-строевой и  
газодымозащитной подготовки  
в составе учебно-научного комплекса пожаротушения  
полковник внутренней службы, канд. техн. наук



И.В. Коршунов





УТВЕРЖДАЮ

Начальник Главного управления МЧС  
России по Приморскому краю  
генерал-майор внутренней службы

Р.Г. Чурсин  
2010 года

М.П.

## АКТ

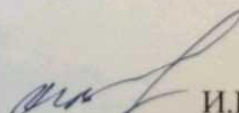
внедрения результатов диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук профессора Академии ГПС МЧС России кандидата технических наук Ищенко Андрея Дмитриевича в деятельность подразделений Федеральной противопожарной службы по тушению пожаров объектов энергетики

Комиссия в составе: заместителя начальника Главного управления МЧС России по Приморскому краю по Государственной противопожарной службе полковника внутренней службы Сараны Игоря Владимировича, начальника Центра управления в кризисных ситуациях Главного управления МЧС России по Приморскому краю полковника внутренней службы Краснова Сергея Михайловича, временно исполняющего обязанности начальника 2 пожарно-спасательного отряда ФПС ГПС Главного управления МЧС России по Приморскому краю майора внутренней службы Поварова Константина Сергеевича, начальника службы пожаротушения 2 пожарно-спасательного отряда ФПС ГПС Главного управления МЧС России по Приморскому краю майора внутренней службы Мищука Владимира Николаевича подтверждает, что результаты диссертационного исследования Ищенко Андрея Дмитриевича в части возможности локализации пожаров в помещениях объектов энергетики объемным способом водной средой в метастабильном фазовом состоянии, получения показателей прекращения горения характерных для объектов энергетики материалов и определения параметров улучшения видимости при осаждении дыма водной средой в метастабильном фазовом состоянии в объеме помещений объектов энергетики внедрены в деятельность подразделений Федеральной противопожарной службы по тушению пожаров объектов энергетики.

**Комиссия:**


Председатель комиссии

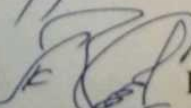
Заместитель начальника Главного управления  
по Государственной противопожарной службе  
полковник внутренней службы


 И.В. Сарана

Члены комиссии:

Начальник ЦУКС Главного управления  
полковник внутренней службы  
Врио начальника 2 ПСО ФПС ГПС  
Главного управления  
майор внутренней службы  
Начальник СПГ 2 ПСО ФПС ГПС  
Главного управления  
майор внутренней службы

 С.М. Краснов

 К.С. Поваров

 В.Н. Мищук



МЧС РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ВСЕРОССИЙСКИЙ ОРДЕНА «ЗНАК ПОЧЕТА»  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ОБОРОНЫ  
МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ,  
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ  
ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ»

(ФГБУ ВНИИПО МЧС России)

мкр. ВНИИПО, д. 12, г. Балашиха,  
Московская область, 143903  
Телефон: (495) 521-23-33  
Факс: (495) 529-82-52, 524-98-99  
E-mail: [vniipo@mail.ru](mailto:vniipo@mail.ru); <http://www.vniipo.ru>

“УТВЕРЖДАЮ”

Начальник  
ФГБУ ВНИИПО МЧС России  
доктор технических наук

Гордиенко Д.М.

2020 г.



**АКТ О ВНЕДРЕНИИ**

научных положений докторской диссертации Ищенко А.Д. на тему:  
«Методы и средства обеспечения тушения пожаров объектов энергетики»

Комиссия в составе: заместителя начальника ФГБУ ВНИИПО МЧС России Павлова Е.В.; начальника отдела 1.3 ФГБУ ВНИИПО МЧС России Харина В.В.; заместителя начальника отдела 1.3 ФГБУ ВНИИПО МЧС России Маштакова В.А.; ведущего научного сотрудника отдела 1.3 ФГБУ ВНИИПО МЧС России, канд. физ.-мат. наук Кондашова А.А., составили настоящий акт в том, что результаты докторской диссертации Ищенко А.Д. использованы при выполнении НИР «Исследование деятельности органов управления пожарной охраны по нормированию численности и технической оснащённости подразделений пожарной охраны» (НИР «Нормирование ресурсов ПО»). НИР выполнялась согласно п.5 Плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ МЧС России на 2019 год и на плановый период 2020 и 2021 годов, утвержденного приказом МЧС России от 2 апреля 2019 г. №195.

В частности, использованы, разработанные Ищенко А.Д., принципы определения достаточности сил и средств пожарно-спасательных гарнизонов по тушению пожаров объектов энергетического комплекса, позволяющие обеспечить тушение пожаров с минимальными потерями для объекта.

**Председатель комиссии:**

Заместитель начальника  
ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Павлов Е.В.

**Члены комиссии:**

Начальник отдела 1.3  
ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Харин В.В.

Заместитель начальника отдела 1.3  
ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Маштаков В.А.

Ведущий научный сотрудник отдела 1.3  
ФГБУ ВНИИПО МЧС России, канд. физ.-мат. наук

Кондашов А.А.





## МЧС РОССИИ

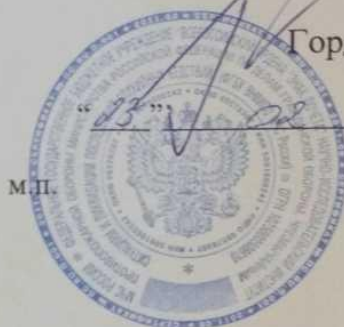
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ВСЕРОССИЙСКИЙ ОРДЕНА «ЗНАК ПОЧЕТА»  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ОБОРОНЫ  
МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ,  
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ  
ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ»

(ФГБУ ВНИИПО МЧС России)

мкр. ВНИИПО, д. 12, г. Балашиха,  
Московская область, 143903  
Телефон: (495) 521-23-33  
Факс: (495) 529-82-52, 524-98-99  
E-mail: [vniipo@mail.ru](mailto:vniipo@mail.ru); <http://www.vniipo.ru>

“УТВЕРЖДАЮ”  
Начальник  
ФГБУ ВНИИПО МЧС России  
доктор технических наук

Гордиенко Д.М.



2020 г.

М.П.

## А К Т О ВНЕДРЕНИИ

научных положений докторской диссертации Ищенко А.Д. на тему:  
«Методы и средства обеспечения тушения пожаров объектов энергетики»

Комиссия в составе: заместителя начальника ФГБУ ВНИИПО МЧС России Павлова Е.В.; начальника отдела разработки мероприятий по поддержке принятия решений (ситуационного центра) ФГБУ ВНИИПО МЧС России к.т.н. Власова К.С.; начальника отдела 1.5 НИЦ ОУП ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России Зыкова В.В. и заместителя начальника отдела 1.5 НИЦ ОУП ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России Гладких А.Н., составили настоящий акт в том, что результаты докторской диссертации Ищенко А.Д. использованы при выполнении НИР «Исследование оперативного реагирования и эффективности действий подразделений пожарной охраны при тушении крупных пожаров и проведении связанных с ним аварийно-спасательных работ». НИР выполнялась согласно п.38 Плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ МЧС России на 2019 год и на плановый период 2020 и 2021 годов, утвержденного приказом МЧС России от 2 апреля 2019 г. №195.

В частности, использованы, разработанные Ищенко А.Д., математические модели и алгоритмы расчета, позволяющие оптимизировать состав сил и средств оперативных подразделений пожарной охраны по защите объектов энергетики и формировать научно обоснованные предложения по оптимизации их технического оснащения.

### Председатель комиссии:

Заместитель начальника ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Павлов Е.В.

### Члены комиссии:

Начальник отдела разработки мероприятий по поддержке принятия решений ФГБУ ВНИИПО МЧС России, к.т.н.

Власов К.С.

Начальник отдела 1.5 НИЦ ОУП ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Зыков В.В.

Заместитель начальника отдела 1.5 НИЦ ОУП ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Гладких А.Н.



Общество с ограниченной ответственностью  
**«МЫТИЩИНСКИЙ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД»**  
 141004, г. Мытищи, Московская область, 1-й Силикатный пер., 12  
 Тел.: +7 (495) 583-6675; 583-4942 Факс: +7 (495) 583-3672  
 www.mpz.ru E-mail: info@mpz.ru



УТВЕРЖДАЮ  
 Генеральный директор  
 ООО «Мытищинский  
 приборостроительный завод»  
 Б.Р. Бейзерман  
 2020 г.

### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук, профессора Академии ГПС МЧС России кандидата технических наук Ищенко Андрея Дмитриевича на тему:  
 «Методы и средства обеспечения тушения пожаров объектов энергетики»  
 в процесс разработки перспективных изделий предприятия

Комиссия в составе:

Технического директора Блохина И.В., руководителя проектов Прохорова Д. А., главного инженера Воронова С. В. подтверждает, что результаты диссертационного исследования Ищенко Андрея Дмитриевича в части обоснования прототипа многофункционального технического комплекса обеспечения работ в непригодной для дыхания среде при пожарах и авариях в энергетической отрасли используются в процессе разработки перспективных изделий предприятия, предназначенных для нужд МЧС России.

**Комиссия:**

Технический директор

И.В. Блохин

Руководитель проектов

Д. А. Прохоров

Главный инженер

С. В. Воронов



Приложение к приказу  
АО «Концерн Росэнергоатом»  
от 08.04.2016 № 9/530-17

Акционерное общество  
«Российский концерн по производству электрической  
и тепловой энергии на атомных станциях»

(АО «Концерн Росэнергоатом»)

**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель Генерального  
директора – директор по  
производству и эксплуатации АЭС

\_\_\_\_\_ А.Г. Жуков  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г

**ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА АТОМНЫХ  
СТАНЦИЙ ПРИ ПОЖАРАХ (АВАРИЯХ) В УСЛОВИЯХ НЕПРИГОДНОЙ  
ДЛЯ ДЫХАНИЯ СРЕДЫ  
ИНСТРУКЦИЯ**

И 1.3.2.15.1111 - 2016





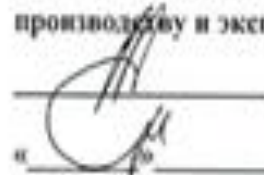
Приложение к приказу  
ОАО «Концерн Росэнергоатом»  
от 05.10.2015 № 9/1102-11

Открытое акционерное общество  
«Российский концерн по производству электрической  
и тепловой энергии на атомных станциях»

(ОАО «Концерн Росэнергоатом»)

**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель Генерального  
директора – директор по  
производству и эксплуатации АЭС

  
\_\_\_\_\_ А.Г. Жуков  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015

**ОРГАНИЗАЦИЯ ТРЕНИРОВОК  
ЛИЧНОГО СОСТАВА ОБЪЕКТОВЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ФПС  
ПО ОХРАНЕ АЭС И ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА АЭС,  
В ТОМ ЧИСЛЕ СОВМЕСТНЫХ, НА БАЗЕ ОГНЕВЫХ УЧЕБНО-  
ТРЕНИРОВОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ (ПОЛИГОНОВ),  
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НА АЭС**

Методические рекомендации

МР 1.3.2.09.1026-2015

**Приложение Б**

**Патенты Российской Федерации, свидетельства о регистрации программ  
для электронно-вычислительных машин**



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2618259

## УСТРОЙСТВО ОСАЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЯ

Патентообладатели: *Роевко Владимир Васильевич (RU), Мишина Елена Юрьевна (RU), Ищенко Андрей Дмитриевич (RU), Карпенко Елена Олеговна (RU), Соковнин Артем Игоревич (RU)*

Авторы: *Роевко Владимир Васильевич (RU), Мишина Елена Юрьевна (RU), Ищенко Андрей Дмитриевич (RU), Карпенко Елена Олеговна (RU), Соковнин Артем Игоревич (RU)*

Заявка № 2015139746

Приоритет изобретения 18 сентября 2015 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 03 мая 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 18 сентября 2035 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2307688

**СПОСОБ КОМПОНОВКИ ИЗОЛИРУЮЩЕГО  
ДЫХАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ОТКРЫТОЙ СХЕМОЙ  
ДЫХАНИЯ**

Патентообладатель(ли): **Ищенко Андрей Дмитриевич (RU),  
Черепанов Михаил Геннадьевич (RU)**

Автор(ы): **Ищенко Андрей Дмитриевич (RU), Черепанов  
Михаил Геннадьевич (RU)**

Заявка № 2006101910

Приоритет изобретения **11 января 2006 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации **10 октября 2007 г.**

Срок действия патента истекает **11 января 2026 г.**

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам*



Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2301189

**СПОСОБ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ  
ПРОТИВОПОЖАРНОГО, АВАРИЙНО-  
СПАСАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ,  
ПОСТРАДАВШИХ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО  
ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ (ВАРИАНТЫ)**

Патентообладатель(ли): **Ищенко Андрей Дмитриевич (RU),  
Черепанов Михаил Геннадьевич (RU)**

Автор(ы): **Ищенко Андрей Дмитриевич (RU), Черепанов  
Михаил Геннадьевич (RU)**

Заявка № 2005113099

Приоритет изобретения **26 апреля 2005 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации **20 июня 2007 г.**

Срок действия патента истекает **26 апреля 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2277431

**СПОСОБ ЭКОНОМИИ РЕСУРСА СРЕДСТВ  
ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ  
И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

Патентообладатель(ли): **Ищенко Андрей Дмитриевич (RU),  
Черепанов Михаил Геннадьевич (RU)**

Автор(ы): **Ищенко Андрей Дмитриевич (RU), Черепанов  
Михаил Геннадьевич (RU)**

Заявка № 2004126734

Приоритет изобретения 06 сентября 2004 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации 10 июня 2006 г.

Срок действия патента истекает 06 сентября 2024 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО


о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018662062

«Программа по оценке достаточности сил и средств тушения  
пожара»Правообладатели: *Ищенко Андрей Дмитриевич (RU), Соковнин  
Артем Игоревич (RU)*Авторы: *Ищенко Андрей Дмитриевич (RU),  
Соковнин Артем Игоревич (RU)*

Заявка № 2018613990

Дата поступления 11 апреля 2018 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 26 сентября 2018 г.Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности Г.П. Иевлев