

НАУЧНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ РИСКИ**  
(ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ)

**NATURAL AND TECHNOLOGICAL RISKS**  
(PHYSICS-MATHEMATICAL AND APPLIED ASPECTS)

**№ 1 (33) – 2020**

**Редакционный совет**

**Председатель** – доктор химических наук, профессор, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники **Ивахнюк Григорий Константинович**, заведующий кафедрой инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

**Заместитель председателя** – доктор политических наук, кандидат исторических наук, доцент **Мусиенко Тамара Викторовна**, заместитель начальника университета по научной работе.

**Заместитель председателя** (ответственный за выпуск журнала) – доктор педагогических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации **Медведева Людмила Владимировна**, заведующий кафедрой физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности, руководитель учебно-научного комплекса – 6 «Физико-математическое, инженерное и информационное обеспечение безопасности при ЧС».

**Члены редакционного совета:**

доктор технических наук, профессор **Минкин Денис Юрьевич**, директор Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова;

доктор технических наук, профессор **Шарапов Сергей Владимирович**, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России;

кандидат юридических наук, доктор педагогических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации **Грешных Антонина Адольфовна**, декан факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России;

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации **Поляков Александр Степанович**, профессор кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России;

доктор технических наук, профессор, почетный работник науки и техники **Барбин Николай Михайлович**, ведущий научный сотрудник УрИ ГПС МЧС России, директор научно-исследовательского института физико-химических проблем и техносферной безопасности государственного аграрного университета;

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат Государственной премии Российской Федерации и премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники **Потапов Анатолий Иванович**, заведующий

кафедрой «Приборы контроля и систем экологической безопасности» Северо-Западного государственного заочного технического университета Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России;

кандидат физико-математических наук, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации **Сильников Михаил Владимирович**, профессор кафедры горноспасательного дела и взрывобезопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России;

кандидат педагогических наук, доцент **Клюй Валерий Владимирович**, профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России.

**Секретарь совета:**

капитан внутренней службы **Домничева Анастасия Вячеславовна**, редактор отделения предпечатной подготовки редакционного отдела центра организации научно-исследовательской и редакционной деятельности.

## **Редакционная коллегия**

**Председатель** – подполковник внутренней службы **Стёпкин Сергей Михайлович**, начальник редакционного отдела центра организации научно-исследовательской и редакционной деятельности.

**Заместитель председателя** – майор внутренней службы **Алексеева Людмила Викторовна**, начальник отделения – главный редактор редакционного отделения редакционного отдела центра организации научно-исследовательской и редакционной деятельности.

**Члены редакционной коллегии:**

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации **Щербаков Олег Вячеславович**, профессор кафедры прикладной математики и информационных технологий;

доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации **Таранцев Александр Алексеевич**, профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ;

кандидат технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации **Антюхов Валерий Иванович**, профессор кафедры системного анализа и антикризисного управления;

кандидат технических наук, доцент **Романов Николай Николаевич**, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности;

кандидат педагогических наук, доцент **Подружкина Татьяна Александровна**, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий;

кандидат технических наук, доцент **Виноградов Владимир Николаевич**, инженер отдела планирования, организации и координации научных исследований центра организации научно-исследовательской и редакционной деятельности.

**Секретарь коллегии:**

майор внутренней службы **Болотова Полина Александровна**, редактор редакционного отделения редакционного отдела центра организации научно-исследовательской и редакционной деятельности.



## СОДЕРЖАНИЕ

### **МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ**

**Ахунова Д.Г., Буйневич М.В., Власов С.С.** Обеспечение пожарной безопасности производственных объектов на основе информатизации риск-менеджментного подхода..... 5

**Григорьева Е.С., Иванов А.Н.** Методика выбора элементов системы оповещения и управления эвакуацией для объектов религиозного назначения..... 12

### **ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

**Лабинский А.Ю.** Особенности течения смеси газа с твердыми частицами в струйных аппаратах..... 17

**Кузьмин А.А., Романов Н.Н., Калистова Е.А.** Оптимизация расчета температурного режима пожара в помещении для оценки огнестойкости ограждающих конструкций..... 21

**Иванов А.В., Скрипник И.Л., Воронин С.В.** Снижение статической электризации диэлектрических материалов в условиях электрофизического воздействия..... 27

**Минкин Д.А., Дахкильгов М.С.** Методика и программа расчета проточных электрических подогревателей для систем транспортировки углеводородного топлива..... 33

**Трубилко А.И.** Классическая модель атома и магнетизм в вопросах пожарно-технических экспертиз..... 39

### **ИНЖЕНЕРНОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

**Кузьмин А.А., Романов Н.Н., Жандаров А.З.** Методика расчета распределения температуры по толщине потолочного перекрытия в условиях внутреннего пожара..... 50

**Минкин Д.А., Загайнов К.В.** Материалы и методы повышения огнестойкости огнезащитных противопожарных штор..... 58

**Ершова М.И., Самойленко С.А., Иванов А.Н.** Выбор типа пожарных извещателей для Тихвинского Введенского собора на основе анализа целевой функции..... 66

**Сай В.В., Каланин И.И., Петросян С.Х.** Использование тренажерных комплексов в процессе подготовки сотрудников МЧС России..... 72

**Сведения об авторах** ..... 77

**Информационная справка** ..... 63

**Авторам журнала «Природные и техногенные риски» (физико-математические и прикладные аспекты)** ..... 68

Полная или частичная перепечатка, воспроизведение, размножение  
либо иное использование материалов, опубликованных в журнале  
«Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)»,  
без письменного разрешения редакции не допускается

**ББК Ц.9.3.2**  
**УДК 504+614.8(051.2)**

Отзывы и пожелания присылать по адресу: 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149. Редакция журнала «Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)»; тел. (812) 645-20-35. E-mail: redakziaotdel@yandex.ru. Официальный интернет-сайт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России: WWW.IGPS.RU

**ISSN 2307-7476**

© Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 2020

---

---

# МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

---

---

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАТИЗАЦИИ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТНОГО ПОДХОДА

**Д.Г. Ахунова;**

**М.В. Буйневич, доктор технических наук, профессор;**

**С.С. Власов.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Актуализирован вопрос удовлетворения информационных потребностей должностных и ответственных лиц за обеспечение пожарной безопасности производственных объектов. Рассмотрены возможные подходы к автоматизации этого процесса, описанного в нотации авторского «ландшафта». Предложено использование риск-менеджментного подхода применительно к деятельности ответственного за пожарную безопасность и раскрыто его контекстное содержание. Сформулирована и структурирована задача обеспечения пожарной безопасности производственных объектов на основе информатизации риск-менеджментного подхода.

*Ключевые слова:* пожарная безопасность, производственный объект, информационные потребности, метод автоматизации, «ландшафт» безопасности, риск-менеджмент

## ENSURING FIRE SAFETY OF INDUSTRIAL FACILITIES BASED ON THE RISK-MANAGEMENT INFORMATIZATION

**D.G. Akhunova; M.V. Buinevich; S.S. Vlasov.**

**Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia**

The issue of meeting the information needs of officials and responsible persons for ensuring the fire safety of production enterprises has been actualized. Possible approaches to the automation of this process described in the notation of the author's "landscape" are considered. The use of a risk management approach is proposed in relation to the activities of the fire safety officer, and its contextual content is disclosed. The task of ensuring the fire safety of production facilities on the basis of the informatization of the risk management approach is formulated and structured.

*Keywords:* fire safety, production enterprise, information needs, automation method, security «landscape», risk management

В стране насчитывается большое количество (десятки тысяч) производственных объектов (ПрО), на которых трудятся миллионы людей. Это могут быть как объекты промышленного (заводы, фабрики, комбинаты и пр.), так и сельскохозяйственного назначения (фермы, зернохранилища, склады минеральных удобрений и пр.). Кроме того, к ПрО относятся объекты инженерной (мастерские, подстанции, котельные и пр.) и транспортной инфраструктуры (вокзалы, магистральные газопроводы, терминалы,

автобазы и пр.), а также объекты связи (телефонные станции, телецентры, почтовые отделения и пр.) [1].

Эти объекты и их персонал являются основными элементами экономического механизма страны, производя продукцию и оказывая услуги, необходимые для функционирования других предприятий и жизнедеятельности населения страны.

Однозначного и общепринятого определения «Производственный объект» не существует, но очевидно, что оно является видовым по отношению к его родовым понятиям – «производство» и «объект» – и поэтому непременно предполагает наличие определенной технологии производства продукции (услуг) и локализации в пространственно-временном континууме средств (условий, ресурсов) ее обеспечения.

Поэтому под ПрО в дальнейшем, солидаризируясь с [2], будем понимать некую достаточно сложную организационно-техническую систему, состоящую из одного или несколько производственных, административных зданий и сооружений, располагающую собственной инфраструктурой (включая системы гидро-, энерго- и транспортных коммуникаций) и осуществляющую переработку (хранение, транспортировку, утилизацию, обработку и пр.) материальных и/или информационных ресурсов с целью получения конечной продукции или оказания потребительской услуги.

Несмотря на разнообразие (масштаб, вид деятельности) все ПрО неизбежно сталкиваются с проблемами обеспечения безопасности различного толка: промышленной, экологической, информационной, пожарной и т.п.

Среди этих видов можно особо выделить пожарную безопасность, как наиболее насущную и характерную для всех без исключения ПрО. Пожароопасность на сегодняшний день возрастает, так как на ПрО эксплуатируются легковоспламеняющиеся вещества и материалы. Также широкое распространение на производствах получили нефтепродукты и природный газ. В работу внедряют сложные и энергоемкие технологии, которые обладают высокой потенциальной пожароопасностью, что приводит к пожару.

Обеспечение какой-либо безопасности, в том числе и пожарной, на ПрО стратифицированно возлагается или на отдельный департамент, или на отдельное небольшое структурное подразделение и курирующего его деятельность заместителя директора, или на выделенного штатного сотрудника, или на отдельного сотрудника, совмещающего обязанности, или на сотрудника, назначенного ответственным.

В своей деятельности все они испытывают трудности информационного характера (отдельные из которых могут быть весьма критичными для отдельных исполнителей, особенно 4-го и 5-го страт), обусловленные целым рядом причин, а именно:

- значительным количеством  $N$  факторов ( $\Phi_n$ ), которые следует учитывать при обеспечении пожарной безопасности (например:  $\Phi_1$  – конструкция зданий и сооружений;  $\Phi_2$  – плотность и этажность застройки;  $\Phi_3$  – состав, состояние и доступность средств пожаротушения;  $\Phi_4$  – наличие/отсутствие подъездных путей;  $\Phi_5$  – наличие/отсутствие пожарных водоемов и т.п.);

- возросшей динамикой (объем и темпы) изменения  $M$  параметров ( $\Pi_m$ ), описывающих факторы безопасности ( $\Phi_3$  – состав, состояние и доступность средств пожаротушения:  $\Pi_1$  – тип (например: порошковый, углекислотный, воздушно-пенный);  $\Pi_2$  – количество;  $\Pi_3$  – производительность (или ёмкость, рабочая площадь);  $\Pi_4$  – работоспособно/неработоспособно и т.д.);

- возросшим объемом постоянно обновляющихся руководящих документов (РД), требования которых могут противоречить друг другу (по некоторым данным, объем обязательных и рекомендуемых РД составляет свыше тысячи печатных страниц [3]);

- временными ограничениями в виде лимитированного рабочего времени, отводимого на обеспечение безопасности (это связано с первыми тремя трудностями);

- отсутствием «под рукой» необходимой справочной и директивной информации;

– недостаточной квалификацией участников процесса (включая дефицит знаний в конкретной предметной области и смежных областях) и т.д.

Как результат, информационные потребности лиц, ответственных за пожарную безопасность на ПрО, являются неудовлетворенными, что приводит к ненадлежащему исполнению ими своих обязанностей и, как следствие, сохранению высокого уровня риска пожарной опасности. Налицо актуальная задача удовлетворения этих потребностей, от которых зависит безопасность людей и сохранность материальных ценностей.

Согласно Федеральному закону от 20 февраля 1995 г. № 24-ФЗ «Об информации, информатизации и защите информации» [4] решение подобных задач возлагается на информатизацию, которая представляет собой «организационный социально-экономический и научно-технический процесс» и предполагает создание оптимальных условий «на основе формирования и использования информационных ресурсов». В контексте решаемой задачи это может означать создание информационного обеспечения должностного лица, ответственного за пожарную безопасность на ПрО, а также поддерживающих его средств автоматизации.

К сожалению, это определение (как и собственно упоминание об информатизации) не перекечало в пришедший ему на замену Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» [5], что не умаляет понимания содержания информатизации как важнейшего процесса информационного общества, которое далее будет активно использоваться.

### **Подходы к автоматизации деятельности ответственного за пожарную безопасность на ПрО**

Отталкиваясь от необходимости информатизации для удовлетворения информационных потребностей должностных и ответственных лиц при решении ими различных задач по обеспечению пожарной безопасности ПрО (например: оценка состояния готовности первичных средств пожаротушения и эвакуационных выходов, расчет пожарного риска, контроль за соблюдением правил пожарной безопасности на ПрО и пр.), рассмотрим возможные подходы к автоматизации этого процесса.

Традиционный подход состоит в позадачной информатизации деятельности (с последующей ее автоматизацией) – так называемый метод «шахт» [6]. Разработчиками задач при этом подходе могут выступать различные, в том числе и конкурирующие, коллективы исполнителей, что теоретически позволяет выбирать наилучшие реализации. В случае изменения условий решений любой из задач ее модификация не приводит к возможным коллизиям с другими задачами, поскольку не требует согласования. Использование метода «шахт» для информатизации деятельности ответственного за пожарную безопасность на ПрО приводит к дублированию информации, собираемой для разных задач с различной точностью, и в контексте информационного обеспечения деятельности являет собой затратный механизм, хотя и позволяет автоматизировать решаемые задачи по мере необходимости и относительно автономно. В принципе, именно он сейчас и применяется на практике, что приводит к «фрагментарной» или «лоскутной» автоматизации [7].

В противовес – полную автоматизацию любого процесса гарантирует использование так называемого метода «пласта» [6], суть которого заключается в интеграции ВСЕХ информационных ресурсов и ВСЕХ функциональных задач в рамках единой автоматизированной системы под единым интерфейсом. При кажущемся очевидном преимуществе второго подхода создание подобной единой системы применительно к рассматриваемой задаче потребует длительной широкомасштабной разработки, что, скорее всего, будет нерентабельно и потребует господдержки. Более того, ввиду отмеченной выше динамики, задачи могут и будут меняться, что индуцирует непрерывную модернизацию всей системы.

Между использованием этих двух, действительно «полярных» методов, требуется некий более рациональный способ информатизации деятельности ответственного за пожарную безопасность на ПрО.

Этот способ видится в создании ЕДИНОГО информационного пространства связанных информационных ресурсов, отражающих суть и содержание процесса обеспечения пожарной безопасности на ПрО инвариантно к частным задачам, решаемым ответственным или должностным лицом.

Формой такого пространства будет являться база данных реляционного типа (РБД), поскольку очевидно, что информационные ресурсы, отражающие его суть и содержание произвольного, но ЕДИНОГО процесса, взаимосвязаны и взаимообусловлены.

Этапность создания РБД предполагает концептуальное (инфологическое), логическое (дatalogическое) и физическое проектирование.

### «Ландшафт» пожарной безопасности

Для построения концептуальной инфологической модели процесса воспользуемся методологическим подходом, разработанным профессором М.В. Буйневичем [8] и названным им «ландшафтом безопасности», который связывает требования к оператору системы с нарушениями ее безопасности (в результате невыполнения этих требований) посредством цепочки причинно-следственных связей.

В терминах вышеупомянутого «ландшафта» обеспечение пожарной безопасности на ПрО может быть концептуально описано следующими информационными объектами и понятиями настоящей предметной области и связями между ними (рис.):

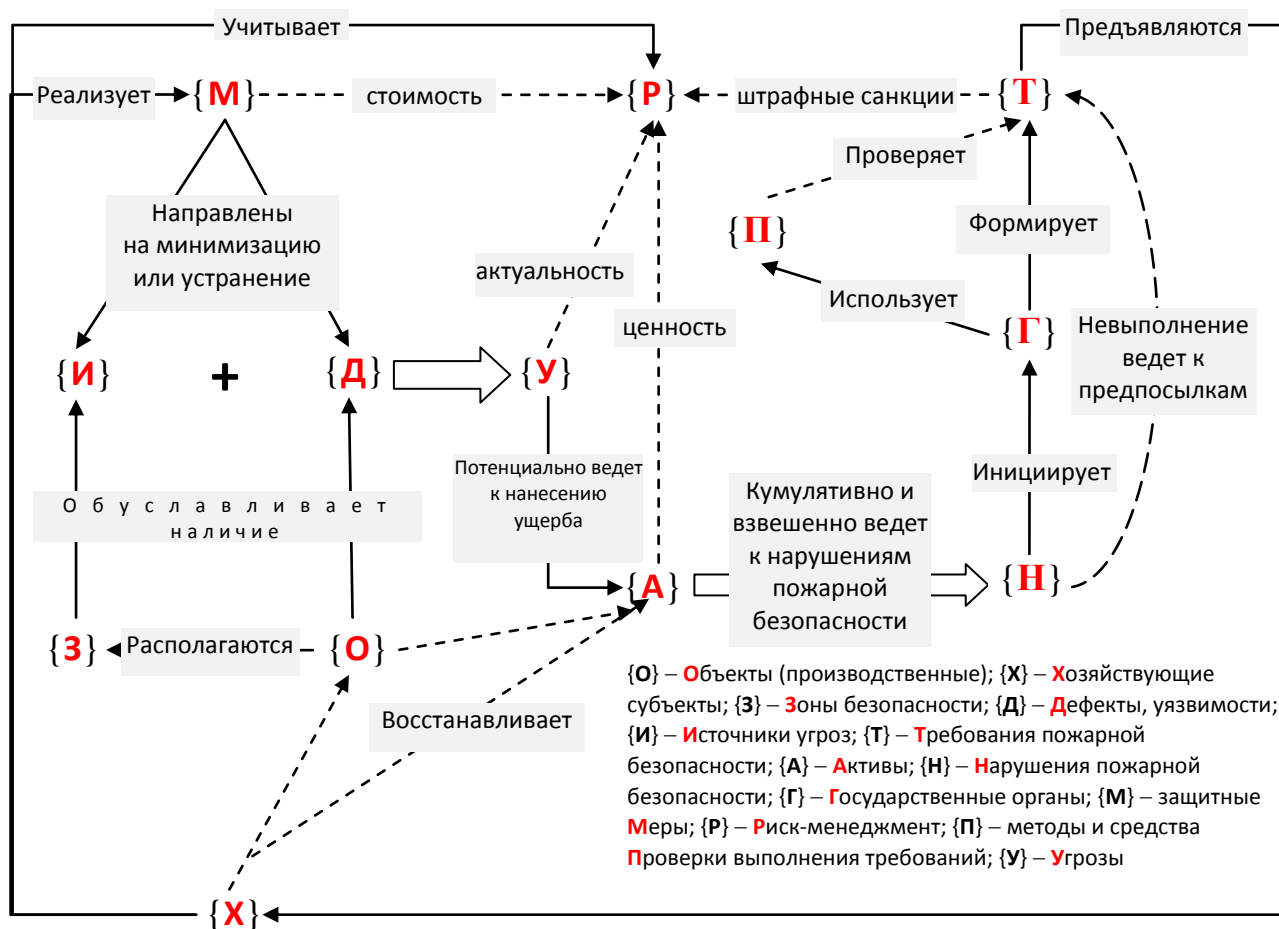


Рис. «Ландшафт» пожарной безопасности

Зафиксированные и юридически значимые инциденты пожарной безопасности на ПрО (иными словами, **Нарушения** пожарной безопасности – **Н**) инициируют нормотворческую деятельность государственных органов (**Г**) по генерации **Требований** (**Т**), направленных на профилактику и недопущение подобных нарушений. Соответствующий регулятор от лица государства осуществляет **Проверку** (**П**) их выполнения. Эти требования предъявляются к **Хозяйствующему субъекту** («хозяину» ПрО – **Х**), который транслирует их в комплекс **Мер и Мероприятий** по защите от пожара (**М**). В свою очередь эти меры и мероприятия могут быть направлены, как на **Источники** (**И**) угроз пожарной безопасности (с целью их ликвидации или ослабления влияния), так и на уязвимости (или **Дефекты** – **Д**) элементов и конструкций ПрО (с целью повышения их устойчивости к возгоранию). Очевидно, что на расположенные в различных **Зонах** (**З**) элементы и конструкции производственных **Объектов** (**О**) воздействуют различные источники. Источники и уязвимости совместно образуют различные причины возгорания – факторы пожарной опасности ПрО – и приводят к **Угрозам** (**У**) возгорания, которые через нанесение ущерба **Активам** (**А**), под которыми понимаются материальные ценности и люди, кумулятивно и взвешенно ведут к нарушениям пожарной безопасности. Тем самым, по вышеописанной причинно-следственной цепочке, невыполнение требований пожарной безопасности потенциально ведет к соответствующим нарушениям.

### **Суть и информационное содержание риск-менеджментного подхода**

Ключевым элементом «ландшафта» является **Риск-менеджмент** (**Р**), к которому прибегает хозяйствующий субъект для формирования комплекса мер и мероприятий по защите от пожара на ПрО. При выборе и обосновании состава мер и мероприятий учитывается их стоимость (в широком смысле слова, как затраты: финансовые, людские, временные и пр.), актуальность угроз (под которой понимается риск – произведение вероятности реализации на величину возможного ущерба), ценность активов, а также штрафные санкции от регулятора в случае невыполнения требований пожарной безопасности. Примитивным примером здесь может явиться принятие решения о нецелесообразности приобретения средств пожаротушения, стоимость которых превышает стоимость возможного ущерба от пожара.

Суть предлагаемого здесь риск-менеджментного подхода (применительно к деятельности ответственного за пожарную безопасность на ПрО) заключается в управлении пожарными рисками, под которыми понимается целенаправленная деятельность по оценке рисков, их последующей обработке, мониторингу эффективности, а также принятию корректирующих мер [9].

Раскроем контекстное содержание составляющих процесса управления рисками.

Под оценкой риска здесь понимается следующее. Во-первых, инвентаризация и регулярная ревизия активов (**А**) с составлением и поддержанием актуального реестра; возможно, дополнительно потребуется классификация и категорирование активов (например, объект  $O_{11}$  – такой-то степени или категории). Во-вторых, идентификация требований (**Т**), как законодательства (**Г**), так и бизнеса (**Х**); первая группа требований, как правило, носит обязательный характер и проистекает из общепринятой практики (так называемой, Best Practice), а вторая – желательный характер и определяется самостоятельно, исходя из потребностей и специфики бизнеса. В-третьих, установление ценности активов (**А**) с точки зрения важности для бизнеса и общества; ценность того или иного актива определяется величиной прямого или косвенного ущерба и может выражаться через финансовые или имиджевые потери, а также через санкции со стороны регулирующих или даже правоохранительных органов. В-четвертых, анализ угроз по некоей канонической цепочке, называемой профилем: идентификатор угрозы (в соответствии с принятой классификацией) → источник (**И**) угрозы → способ реализации угрозы (**У**) → объект защиты (**О**) → последствия, ущерб активам (**А**) → уязвимости-дефекты (**Д**) как собственно объектов, так и системы защиты.



Обработка риска заключается в использовании четырех взаимоисключающих способов или приемов.

Первый – уменьшение риска до приемлемого уровня, определяемого регулятором (Г) или хозяйствующим субъектом (Х). Способы реализации данного приема проистекают из определения риска [10] как «комбинации вероятности события (контекстно – Угрозы) и его последствий (контекстно – Ущерба) и заключаются в принятии контрмер (М), направленных на источники угроз (И) и уязвимости-дефекты (Д), или в восстановлении активов (А) после нанесения им ущерба (рис.).

Второй – сохранение (принятие) риска. Риски ниже приемлемого уровня считаются допустимыми и могут быть приняты, то есть оставлены без реакции со стороны хозяйствующего субъекта (Х). На принятие этого решения главным образом влияют его ресурсные (финансовые, кадровые и пр.) возможности и внутренняя политика безопасности.

Третий – передача (делегирование) риска. Способ применяется, когда представляется крайне затруднительным или даже невозможным уменьшение риска до приемлемого уровня, а также когда экономически более оправдана передача риска некой («третьей») стороне. Для этого широко используются два основных механизма: традиционно – страхование ответственности и несколько реже – аутсорсинг.

И четвертый – избежание риска. Способ коррелирует с первым в том смысле, что тоже минимизирует или устраняет источники угроз (И) и уязвимости-дефекты (Д), однако не прямым, а косвенным путем – путем манипуляции хозяйствующего субъекта (Х) с активами (А) за счет ревизии бизнес-процесса. Например, за счет перемещения оборудования в более безопасное место (зону) или даже за пределы ПрО, или замены от легковоспламеняющихся технологических компонент более современными и потому безопасными, или отказа от рискованных бизнес-активностей.

После принятия решения касательно обработки рисков разрабатывается план его реализации с выделением необходимых ресурсов; процесс реализации плана сопровождается мониторингом эффективности. Подавляющее большинство мер, спланированных к реализации на предыдущем этапе, требует администрирования (сопровождения) и контроля на предмет исполнения и функционирования. Изменение условий (технологии, окружающей среды и пр.) неизбежно приводит к тому, что «оптимальное» решение, принятое в момент «Ч», становится псевдо оптимальным (неэффективным) на момент «Ч+» при изменении условий его принятия, что согласуется с общеизвестной тенденцией ухудшения, со временем, работы любого механизма. Мониторинг как раз и предназначен для выявления таких нарушений и инициирования корректирующих воздействий [9] по принципу положительной обратной связи из теории автоматического управления. В качестве источника мониторинга могут использоваться и результаты аудита пожарной безопасности, однако более целесообразно организовать его на регулярной основе, которая не позволит пропустить критические изменения условий, требующие ревизии первоначальной оценки (переоценки) рисков и принятых решений (повторной обработки рисков); в остальных случаях достаточным является принятие корректирующих (не кардинальных) мер.

Описанная деятельность по управлению рисками ответственного за обеспечение пожарной безопасности на ПрО требует обладания им необходимой и достаточной информацией для принятия обоснованных решений, то есть должны быть удовлетворены его информационные потребности, о чем указывалось выше. Представляется, что организованная по типу «ландшафта» РБД предназначена как раз для этих целей. Задача конструирования и наполнения РБД видится в направлении идентификации, агрегирования и структуризации информации, используемой при обеспечении пожарной безопасности. Эта информация может быть получена в результате информационного анализа функциональных обязанностей ответственного за обеспечение пожарной безопасности на ПрО, применяющего в своей работе риск-менеджментный подход. Научным результатом здесь будут являться его информационные потребности. Границы этих потребностей на сегодняшний день

не определены, что является сдерживающим фактором информатизации процесса обеспечения пожарной безопасности. Вопрос формирования требований к актуализации и детализации подобной РБД также является открытым.

Процесс управления рисками представляется достаточно сложным в интеллектуальном плане, что позволяет предположить обязательное наличие в распоряжении ответственного за обеспечение пожарной безопасности на ПрО средств автоматизации в виде автоматизированного рабочего места (АРМ). Вопрос создания и наполнения такого АРМ в настоящее время также является открытым, однако можно предположить его модульную архитектуру в составе, как минимум, интерфейсного, функционального, информационного и абонентского модулей. Первый (как следует из названия) призван организовать комфортную целеориентированную среду для «цифровой» работы ответственного за обеспечение пожарной безопасности на ПрО в соответствии с современными представлениями [11], а второй (информационный) – удовлетворить его информационные потребности на основе РБД по типу «ландшафта». Третий (функциональный) должен обеспечить ответственного за обеспечение пожарной безопасности на ПрО необходимым и достаточным набором инструментария по всей иерархической цепочке работы с информацией: функциональная задача (например, расчет риска) – функция (например, работа с РБД) – операция (например, поиск) – информационно-функциональный примитив (например, чтение). И четвертый (абонентский) отвечает за безопасное подключение АРМ к услугам некоего «Единого информационно-функционального пространства», которое на сегодня представлено всеми сервисами и информационными ресурсами глобальной сети Интернет. модульная архитектура, как совокупность логической, информационной, программной и системотехнической структур АРМ ответственного за обеспечение пожарной безопасности ПрО, а также обоснованные требования к интерфейсному, информационному, функциональному и абонентскому модулям представляют значительный научно-практический интерес.

В отсутствие АРМ ответственный за обеспечение пожарной безопасности на ПрО по возможности использует доступный программный инструментарий (например, Fenix+ [12] – для моделирования развития пожара, расчета времени эвакуации и вычисления пожарных рисков), что, несомненно, облегчает его работу. Однако интеграцию используемых информационных ресурсов и результатов промежуточных расчетов в режиме «24x7» человеку по-прежнему приходится осуществлять в голове, со всеми вытекающими интеллектуальными издержками в виде ошибок, забывания, временного цейтнота и психоэмоциональных перегрузок. При наличии АРМ он должен взять основную работу по интеграции на себя, предоставив ответственному за обеспечение пожарной безопасности на ПрО некую технологическую карту его деятельности, поддержанную необходимыми информационными ресурсами в каждой точке траектории. В этом смысле АРМ содержит, помимо информационной РБД, еще и БДУ – базу информационно-функциональных услуг (по типу сервисов сети Интернет), поэтому может считаться интерактивным (активным АРМ – А-АРМ). И вся деятельность ответственного за обеспечение пожарной безопасности на ПрО, обладающего А-АРМ, представляет собой исполнение ТИПОВЫХ автоматизированных сценариев.

Создание таких сценариев в нотации информационно-функциональных услуг, как впрочем, и синтез собственно БДУ, представляет собой нетривиальную научную задачу, однако при получении значимых результатов можно будет говорить о прорыве в области обеспечения информатизации пожарной безопасности, в частности на ПрО.

## **Литература**

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон Рос. Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (в ред. от 10 июля 2012 г.) // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2008. № 30. Ст. 3579.

2. Инюшин Е.А. Противопожарная защита как интегрированное решение в автоматизации зданий // Алгоритм безопасности. 2016. № 4. С. 30–33. URL: [https://algorithm.org/arch/16\\_4/16\\_4\\_11.pdf](https://algorithm.org/arch/16_4/16_4_11.pdf) (дата обращения: 07.12.2019).
3. Бакиров И.К., Хафизов Ф.Ш., Султанов Р.М. Проблемы применения нормативных документов по пожарной безопасности // Общие вопросы пожарной безопасности. 2014. Т. 23. № 1. С. 7–10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-primeneniya-normativnyh-dokumentov-po-pozharnoy-bezopasnosti> (дата обращения: 15.08.2019).
4. Об информации, информатизации и защите информации: Федер. закон Рос. Федерации от 20 февраля 1995 г. № 24-ФЗ // Собр. законодательства Рос. Федерации. 1995. № 8. Ст. 609.
5. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: Федер. закон Рос. Федерации от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2006. № 31. Ст. 3448.
6. Кастеллани К. Автоматизация решения задач управления. М.: Мир, 1982. 482 с.
7. Погожева А.В. Архитектура информационной системы при модульном (комбинированном) подходе к автоматизации бизнес-процессов // Вестник СПбГЭУ, 2014. Вып. 8 (75). С. 130–133.
8. Буйневич М.В., Владыко А.Г., Доценко С.М., Симонина О.А. Организационно-техническое обеспечение устойчивости функционирования и безопасности сетей связи общего пользования. СПб.: СПбГУТ, 2013. 144 с.
9. Астахов А.М. Искусство управления информационными рисками. М.: ДМК Пресс, 2010. 312 с.
10. ГОСТ Р 51897–2011. Менеджмент риска. Термины и определения. ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 18.02.2020)
11. Ахунова Д.Г., Вострых А.В. Преимущества перехода на целеориентированное проектирование интерфейсов для мобильных пользователей информационных систем // В сб. науч. статей: Модернизация информационной инфраструктуры для сетей 5G/IMT 2020 и для других перспективных технологий в интересах трансформации регионов РОСИНФОКОМ-2019. 2019. С. 5–9.
12. АО «Современные программные технологии»: официальный сайт. URL: <https://mst.su/fenix/> (дата обращения: 11.12.2019).

## **МЕТОДИКА ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ОПОВЕЩЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ РЕЛИГИОЗНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Е.С. Григорьева;**

**А.Н. Иванов, кандидат технических наук, доцент;**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Рассматривается классификация системы оповещения и управления эвакуацией людей для объектов религиозного назначения. Проанализированы значимые вопросы, возникающие при проектировании системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Произведены электроакустические расчеты для выбора оборудования системы оповещения. Приведены рекомендации по усовершенствованию системы для объектов религиозного назначения.

*Ключевые слова:* система оповещения и управления эвакуацией, речевой оповещатель, места с массовым пребыванием людей, маломобильные группы населения

# METHOD OF SELECTION OF ELEMENTS OF A NOTIFICATION SYSTEM AND EVACUATION MANAGEMENT FOR OBJECTS OF RELIGIOUS PURPOSE

E.S. Grigoreva; A.N. Ivanov.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The classification of the warning and evacuation management system for religious objects is considered. Significant issues arising in designing a system for managing evacuation of people in a fire are analyzed. Electroacoustic calculations were performed to select the equipment of the warning system. Recommendations are given on improving the system for religious sites.

*Keywords:* warning system and evacuation control, voice siren, places with a massive stay of people, people with limited mobility

На сегодняшний день в России повысилась актуальность вопроса обеспечения пожарной безопасности объектов религиозного назначения. В рамках соответствующего анализа, проведённого в ходе надзорных мероприятий, установлено, что положение дел с пожарами на объектах религиозного назначения и их последствиями во многом обусловлено комплексом проблем правового характера.

В целях усовершенствования законодательства в области обеспечения пожарной безопасности в течение последних четырех лет идет процесс формирования нормативной правовой базы, представляющей собой ряд введенных норм и правил.

В 2016 г. в России был утвержден и введен в действие приказом МЧС России от 23 ноября 2016 г. № 615 Свод правил СП 258.1311500.2016 «Объекты религиозного назначения. Требования пожарной безопасности», что привело к определенному сдвигу в области обеспечения пожарной безопасности объектов религиозного назначения [1].

Одним из главных и серьезных вопросов по обеспечению пожарной безопасности в зданиях и помещениях является установка системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ). Это связано с тем, что, как правило, все они построены по индивидуальным проектам, во времена существования СССР многие неоднократно перестраивались и меняли своё функциональное назначение, среди прихожан преобладают люди пожилого возраста, которым необходимо больше времени для эвакуации в случае пожарной опасности.

В качестве примера для иллюстрации методики выбора элементов СОУЭ для здания религиозного назначения выбрано Иоанна-Богословское подворье Леушинского Иоанно-Предтеченского монастыря (монастырь), находящееся в центре Санкт-Петербурга.

В соответствии с СП 3.1313.2009 «Системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожарах в зданиях и сооружениях» (СП 3.13130.2009) и особенностями выбранного объекта, СОУЭ для здания монастыря должна быть 3-го типа [2].

При установке СОУЭ 3-го типа на объекте обязательно обеспечивается:

– речевое оповещение людей о пожаре путём трансляции в зонах оповещения специальных текстов, предварительно записанных на цифровых носителях и хранящихся в оперативной памяти блоков речевого оповещения. При этом регламентируется очередность оповещения – сначала обеспечивается оповещение зон обслуживающего персонала объекта, а затем всех остальных зон по специально разработанному алгоритму;

– установка световых указателей «Выход» согласно плану эвакуации при пожаре.

СОУЭ 3-типа включает в себя следующие компоненты:

– прибор пожарный управления;

– блоки речевого оповещения;

– акустические модули (акустические колонки, громкоговорители и др.);

– световые указатели «ВЫХОД»;

– световые указатели направления движения (могут быть);

- линии связи и электропитания;
- источник резервного электропитания (возможно встроенный).

Основным этапом комплексной работы по проектированию СОУЭ является электроакустический расчет.

В процессе электроакустического расчета анализируются параметры помещения, рассчитываются уровни акустического давления в расчетных точках, выбираются типы оповещателей, определяются схемы их расстановки.

Точный электроакустический расчет позволяет сделать правильный выбор технических средств СОУЭ и выполнить наиважнейшую задачу – гарантированного своевременного оповещения людей, находящихся в защищаемом здании.

Согласно СП 3.13130.2009 речевые оповещатели должны воспроизводить частоты в диапазоне от 200 до 5000 Гц. Уровень звука оповещения от речевых оповещателей должен соответствовать нормам настоящего свода правил применительно к звуковым пожарным оповещателям [2].

Входные элементы для расчета берутся из технических характеристик выбранного оборудования. В здании подворья монастыря в соответствии с требованием табл. 2 п. 7 СП 3.13130.2009 необходимо установить речевое оповещение.

Проведем расчёты для молельного зала. Рассмотрим и проанализируем три типа речевых оповещателей:

- речевой оповещатель «СОНАТА-М-96- 3Вт»;
- речевой оповещатель «СОНАТА-Т-Л-100-5/3Вт» (при подключении 3 Вт);
- речевой оповещатель «СОНАТА-Т-Л-100-5/3Вт» (при подключении 5 Вт).

В любом помещении всегда присутствует фоновый шум. В зависимости от характеристики помещения, а также времени суток уровень фонового шума изменяется.

На первом этапе расчета определяем необходимый уровень звука оповещения с учетом фонового шума в помещении молельного зала. Уровень фонового шума в помещении был измерен самостоятельно, с помощью прибора «Шумометр Ada Zsm 135» и составил в момент богослужения 72 дБ. Тогда необходимый уровень звукового оповещения, согласно нормативным документам, должен быть на 15 дБ выше:

$$S_{\text{сум}} = S_{\text{шп}} + 15\text{дБ} = 72\text{дБ} + 15\text{дБ} = 87\text{дБ},$$

где  $S_{\text{шп}}$  – уровень шума в помещении, измеренный прибором.

В табл. 1 приведены технические характеристики оповещателей.

Таблица 1. Технические характеристики оповещателей

№ п/п	Модель оповещателя	Мощность включения оповещателя (P), Вт	Уровень звукового давления (S), дБ
1	«СОНАТА-М-96- 3Вт»	3	96
2	«СОНАТА-Т-Л-100-5/3Вт (при подключении 3 Вт)	3	97
3	«СОНАТА-Т-Л-100-5/3Вт (при подключении 5 Вт)	5	100

Вычислим звуковое давление оповещателей при заданной мощности:

$$S_{\text{звук1}} = S + 10 \cdot \lg(P) = 96 + 10 \cdot \lg(3) = 100,77 \text{ дБ};$$

$$S_{\text{звук2}} = S + 10 \cdot \lg(P) = 97 + 10 \cdot \lg(3) = 101,77 \text{ дБ};$$

$$S_{\text{звук3}} = S + 10 \cdot \lg(P) = 100 + 10 \cdot \lg(5) = 106,99 \text{ дБ}.$$

Используя полученные результаты, определяем звуковое давление на расстоянии  $r$  м от оповещателя, опираясь на значения, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость снижения уровня сигнала от расстояния

Расстояние (r)	1	2	3	4	4.5	5	6	7	7.5	8	9	10
Падение звукового давления $L = 20 \cdot \lg(r)$ (дБ)	0	6,02	9,54	12,04	13,06	14	15,6	16,9	17,5	18,1	19,1	20

Графическая интерпретация этой зависимости представлена на рис. 1. Например, если оповещатель «Соната-Т-Л-100-5/3Вт» мощностью 3 Вт на расстоянии 1 м обеспечивает уровень сигнала 97 дБ(А), то на расстоянии 10 м ослабление равно -20 дБ и уровень сигнала составит 77 дБ(А). Зависимость уровня сигнала от расстояния обратно квадратичная, то есть при увеличении расстояния в 10 раз уровень звукового сигнала «падает» в 100 раз, что и составляет при переводе в децибелы -20 дБ.

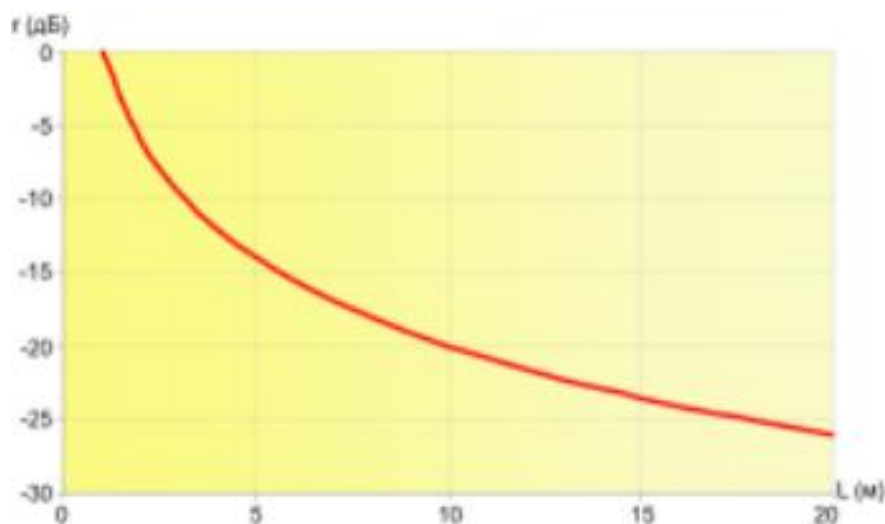


Рис. 1. График ослабления звукового давления в зависимости от расстояния до источника звука

Для расстояния, равного 3 м, ослабление уровня звука будет равным 9,54 дБ.  
Тогда:

$$S_{д1} = S_{звук1} - L = 100,77 - 9,54 = 91,23 \text{ дБ};$$

$$S_{д2} = S_{звук2} - L = 101,77 - 9,54 = 92,23 \text{ дБ};$$

$$S_{д3} = S_{звук3} - L = 106,98 - 9,54 = 97,45 \text{ дБ}.$$

Определим звуковое давление сосредоточенной системы оповещения в точке с наибольшим расстоянием от оповещателя  $r_{\max}$ . В помещении молельного зала оно составит 10,6 м.

Следовательно:

$$S_1 = S_{звук} - 20 \cdot \lg(r_{\max}), \text{ дБ};$$

$$S_1 = S_{звук1} - 20 \cdot \lg(r_{\max}) = 100,77 - 20 \cdot \lg(10,6) = 80,3 \text{ дБ};$$

$$S_2 = S_{звук2} - 20 \cdot \lg(r_{\max}) = 101,77 - 20 \cdot \lg(10,6) = 81,3 \text{ дБ};$$

$$S_3 = S_{звук3} - 20 \cdot \lg(r_{\max}) = 106,98 - 20 \cdot \lg(10,6) = 86,4 \text{ дБ}.$$

Согласно полученным результатам, все три вида речевых оповещателей удовлетворяют условиям, изложенным в п.п. 4.6, 4.7 СП 3.13130.2009 [2]. Это говорит о том, что типы оповещателей выбраны правильно.

Критерием правильности выбора схемы оповещения и типов оповещателей является выполнение следующих условий:

1. Звуковое давление выбранного громкоговорителя «не менее 75 дБА на расстоянии 3 м от оповещателя».

2. Звуковое давление в расчетной точке выше уровня среднестатистического шума в помещении не менее чем на 15 дБ.

Так как все три оповещателя удовлетворяют условиям, окончательный их выбор осуществляется по экономическим критериям.

В заключение необходимо обратить внимание на ещё один момент. Если следовать формальным признакам для определения типа СОУЭ для религиозных объектов (этажность и количество людей), то для некоторых объектов будет подходить 2-тип, в котором не предусмотрено речевое оповещение. Однако, с учетом отмеченных выше особенностей контингента прихожан, необходимо только речевое оповещение. Поэтому при разработке новых нормативных документов по пожарной безопасности объектов религиозного назначения предлагается указать, что СОУЭ для них должна быть не ниже 3-типа.

### **Литература**

1. СП 258.1311500.2016. Объекты религиозного назначения. Требования пожарной безопасности (утв. приказом МЧС России от 23 нояб. 2016 г. № 615) // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 21.02.2020).

2. СП 3.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности (утв. приказом МЧС России от 25 марта 2009 г. № 173) // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 21.02.2020).

3. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 21.02.2020).



---

---

# ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

---

---

## СОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ СМЕСИ ГАЗА С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ В СТРУЙНЫХ АППАРАТАХ

**А.Ю. Лабинский, кандидат технических наук, доцент.  
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Рассмотрены особенности работы струйных аппаратов, использующих в качестве рабочих тел смесь газа с твердыми частицами. Такие струйные аппараты могут быть использованы в различных областях техники.

Рассмотрены особенности течения рабочего тела в струйных аппаратах. Представлена математическая модель течения смеси газа с твердыми частицами, что позволяет производить численные расчеты на ЭВМ с целью оптимизации параметров струйных аппаратов.

*Ключевые слова:* смесь газа с твердыми частицами, струйный аппарат, коэффициент инжекции, математическая модель

## PARTICULARITY OF THE FLOW GAS MIXTURE WITH HARD PARTICLE IN JET DEVICES

A.Yu. Labinskiy. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The article focuses on the peculiarities of operation the jet devices with gas mixture with hard particle making it possible to use jet devices in different technical fields.

The peculiarities of working medium flow in jet devices have been examined. A mathematical model of gas mixture with hard particle flow has been presented. It has been noted that depending on the injection ratio jet devices might have very different characteristics which makes it possible to optimize the parameters of jet devices.

*Keywords:* gas mixture with hard particle, jet device, injection ratio, mathematical model

Течение смесей в струйных аппаратах (СА) рассмотрено в работах ряда авторов, например, в работах [1–5]. СА находят разнообразное применение в различных областях техники, в том числе они могут использоваться как средства паротушения пожаров, а также как средства устранения причин возникновения чрезвычайных ситуаций в работе энергетического оборудования [4].

Одним из методов повышения эффективности СА является использование в них газозвесей (смесей газа с твердыми частицами) в качестве рабочих тел. При введении тонкодиспергированных твердых частиц в поток газа, значительно интенсифицируется процесс теплообмена. При расширении рабочего тела в диффузоре СА теплота, аккумулируемая твердой фазой, в результате возникшего температурного градиента передается потоку газа, совершающему работу. При этом процесс приближается к изотермическому, что приводит к росту КПД цикла.



Как известно из газовой динамики [1], при отводе тепла от движущегося газа полное давление в потоке возрастает. Путем подвода холодных твердых частиц примеси в цилиндрическую камеру смешения СА можно охлаждать газовый поток, что приведет к росту давления смеси за диффузором, а, следовательно, и напора СА. Однако добавление примеси вне сопла СА означает, что примесь имеет меньшую скорость, чем скорость струи, и струя газа затрачивает энергию на разгон частиц. Следовательно, затухание скорости должно происходить быстрее, чем в струе газа, свободной от примеси, что приводит к снижению напора СА. Для определения действительного эффекта от введения твердых частиц в поток газа нужно проводить расчетное исследование течения газозвеси в проточных частях СА.

При исследовании течения газозвеси обычно рассматривается одномерное установившееся течение смеси газа с твердыми частицами с использованием следующих предположений [3]:

- в системе отсутствуют потери массы и энергии;
- массообмен между фазами отсутствует;
- тепловым (Броуновским) движением частиц можно пренебречь;
- частицы не взаимодействуют между собой;
- силы вязкости проявляются лишь при взаимодействии газа и частиц;
- газ является идеальным с неизменным составом;
- частицы сферические, одинаковых размеров;
- градиент температуры по объему частиц отсутствует;
- обмен энергией между газом и частицами осуществляется только конвекцией;
- силы сопротивления являются единственными силами, которые замедляют частицы;
- теплоемкость газа и частиц считается постоянной.

Профиль скорости газа принимается плоским по всему сечению канала. Частицы вызывают дополнительные эффекты, связанные с трением, ускорением и теплообменом с газом. Эти эффекты упрощаются путем рассмотрения твердой фазы как непрерывной и воздействующей на течение лишь как некоторый дополнительный источник тепла и трения.

Расчетная схема струйного аппарата представлена на рис. 1:

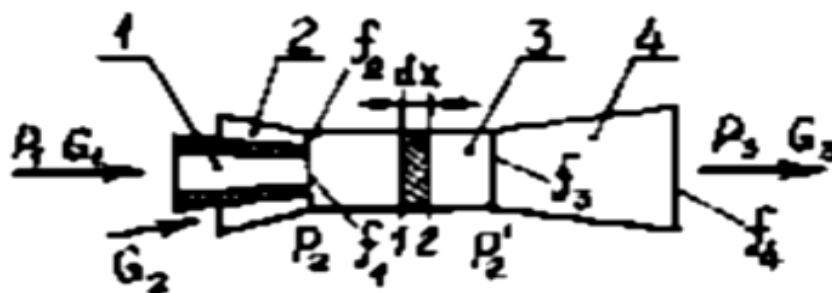


Рис. 1. 1 – центральное сопло; 2 – кольцевое сопло;  
3 – цилиндрическая камера смешения; 4 – диффузор

В соответствии с расчетной схемой СА в центральное сопло поступает горячий газ с массовым расходом  $G_1$ , находящийся под начальным давлением  $P_1$ . В кольцевое сопло поступает смесь холодного газа и твердых частиц с общим массовым расходом  $G_2$  и массовой концентрацией частиц  $\mu$ . Принимается, что в выходном сечении сопел мгновенно перемешиваются потоки горячего и холодного газов, в результате чего далее по камере смешения происходит силовое и тепловое взаимодействие холодных твердых частиц и газового потока, имеющего температуру, определенную из теплового баланса для

полностью перемешанных газовых потоков. В диффузоре наряду с продолжающимся силовым и тепловым взаимодействием твердых частиц и газа происходит частичное преобразование скоростного напора газозвеси в статическое давление.

Система уравнений, описывающих одномерное установившееся течение смеси газа с твердыми частицами с учетом сделанных допущений, будет следующей:

1) уравнения неразрывности для газа и частиц:

$$d\rho_g/\rho_g + dW_g/W_g + dF_g/F_g = dG_g/G_g; \quad (1)$$

$$d\rho_{hp}/\rho_{hp} + dW_{hp}/W_{hp} + dF_{hp}/F_{hp} = dG_{hp}/G_{hp}; \quad (2)$$

2) уравнения количества движения для газа и частиц:

$$\rho_g * W_g * dW_g/dx + dP/dx + dP_s/dx = 0; \quad (3)$$

$$\rho_{hp} * W_{hp} * dW_{hp}/dx + dP/dx + dP_s^*/dx = 0; \quad (4)$$

$$P_s * F_g = P_s^* * F_{hp}; \quad (5)$$

3) уравнения энергии для обеих фаз:

$$G_g * [C_{pg} * dT_g/dx + W_g * dW_g/dx] + G_{hp} * [C_{php} * dT_{hp}/dx + W_{hp} * dW_{hp}/dx] = 0; \quad (6)$$

4) уравнения для определения газодинамического сопротивления:

$$\rho_{hp} * W_{hp} * dW_{hp}/dx = \xi * \rho_g / (2 * R_{hp}) * (W_g - W_{hp})^2; \quad (7)$$

$$dP_s/F_g = x * (\lambda_s / (2 * R_{hp})) * G_g^2 / (2 * \rho_g * F_g^2); \quad (8)$$

5) уравнения теплоотдачи:

$$(4\pi/3) * R_{hp}^3 * \rho_{hp} * C_{php} * dT_{hp}/d\tau = 4\pi * R_{hp}^2 * \alpha * (T_g - T_{hp}); \quad (9)$$

6) уравнение состояния:

$$P_g = R_g * \rho_g * T_g; \quad (10)$$

7) уравнение общего изменения площади проходного сечения:

$$dF_g + dF_{hp} = df(x). \quad (11)$$

В уравнениях (1–11) используются следующие обозначения:  $\rho_g$  – плотность газа;  $\rho_{hp}$  – плотность взвеси;  $W_g$  – скорость газа;  $W_{hp}$  – скорость взвеси;  $F_g$  – проходное сечение газа;  $F_{hp}$  – проходное сечение взвеси;  $G_g$  – массовый расход газа;  $G_{hp}$  – массовый расход взвеси;  $C_{pg}$  – теплоемкость газа;  $C_{php}$  – теплоемкость взвеси;  $\lambda_s$  – коэффициент трения газа о стенку;  $\xi$  – коэффициент сопротивления;  $R_{hp}$  – радиус сферической частицы взвеси;  $P$  – сила давления среды;  $P_s$  – сила трения, приложенная к газу;  $P_s^*$  – сила трения, приложенная к взвеси;  $T_g$  – температура газа;  $T_{hp}$  – температура взвеси;  $x$  – координата, направленная по длине проточной части СА;  $\tau$  – время;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи между газом и взвесью;  $f(x)$  – функция координаты по длине.

Интегрируя уравнения (3–6) в пределах участка (между сечениями 1 и 2) и разрешая их относительно величин  $W_{g2}$ ,  $W_{hp2}$  и  $\Delta t_g = T_g - T_{hp}$  получим:

$$W_{g2} = [(2/\rho_g)*(-\Delta P_s - \Delta P) + W_{g1}^2]^{0,5}; \quad (12)$$

$$W_{hp2} = [(2/\rho_{hp})*(-\Delta P_s * F_g/F_{hp} - \Delta P) + W_{hp1}^2]^{0,5}; \quad (13)$$

$$\Delta t_g = -\Delta t_{hp} * G_{hp} * C_{php} / (G_g * C_{pg}) - (W_{g2}^2 - W_{g1}^2) / (2 * C_{pg1}) - (W_{hp2}^2 - W_{hp1}^2) * (G_{hp} / G_g) / (2 * C_{php1}). \quad (14)$$

Расчет течения газозвеси производится в следующей последовательности. При заданном перепаде давлений на центральном сопле  $P_2 - P_1$  и массовом расходе  $G_1$ , используя формулу Сен-Венана-Ванцеля, определяется величина проходного сечения  $F_1$ . Далее определяется проходное сечение  $F_2 = u * F_1 * \sqrt{(\rho_1/\rho_2)}$ , где коэффициент инжекции  $u = G_2/G_1$ . Сечение камеры смешения  $F_3 = F_1 + F_2$ . Задаваясь углом раскрытия и длиной диффузора, определяется сечение  $F_4$ . Затем определяется приращение давления при смешении горячего и холодного газов:

$$\Delta P^* = (G_g * W_g + G_{hp} * W_{hp}) / F_3 - (G_g + G_{hp})^2 / (F_3^2 * \rho_g). \quad (15)$$

Далее производится расчет параметров газозвеси с учетом теплообмена и трения между твердыми частицами и газом на участках камеры смешения и диффузора. Для этого весь тракт СА на указанных участках разбивается по длине на  $N$  интервалов равной длины (элементарных участков), в пределах которых производится интегрирование уравнений (3–9).

Укрупненная схема расчета течения смеси газа с твердыми частицами в струйном аппарате представлена на рис. 2.

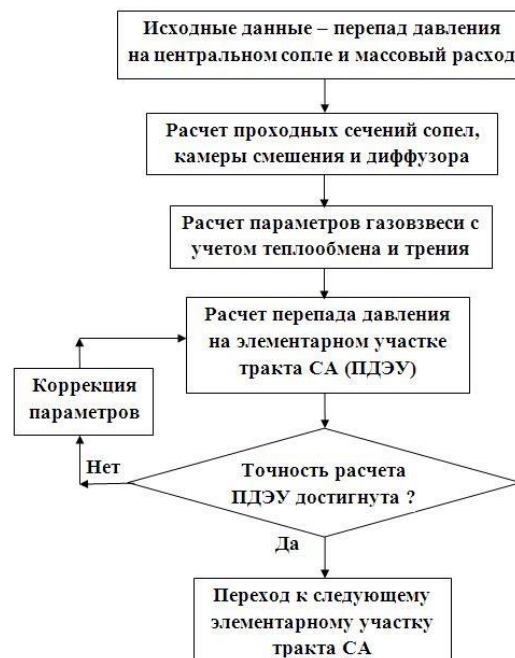


Рис. 2. Укрупненная схема расчета течения смеси газа с твердыми частицами в струйном аппарате

В расчетах также должны использоваться уравнения (10–11), соотношения (12–15) и известные зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи и газодинамического сопротивления.

Так как величина  $\Delta P$  в соотношениях (12) и (13) зависит как от величины  $W_g$ , так и от величины  $W_{hp}$ , то расчет по определению перепада давления на элементарном участке ведется методом итераций. Давление на элементарном участке интегрирования определяется по рекуррентному соотношению Вегстейна:

$$P_k = P_{k-1} + (F_{k-1} - F_L) * (P_{k-1} - P_{k-2}) / (F_{k-2} - F_{k-1}).$$

Разработанная методика расчета может быть реализована на ЭВМ с целью расчетных исследований течения смеси газа с твердыми частицами в проточных частях и определения напорных характеристик СА.

### **Литература**

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Физматгиз, 2001.
2. Вараксин А.Ю. Течение газа с твердыми частицами. М.: Физматгиз, 2006.
3. Исследование потока газа с твердыми частицами в сопле / В.Н. Ветлущий [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. 2012. № 6. Т. 56.
4. Лабинский А.Ю. Аварийное снижение давления в замкнутом объеме с помощью двухфазного струйного аппарата // Проблемы управления рисками в техносфере. 2011. № 4.
5. Терехов В.И., Пахомов М.А. Двухфазное течение газа с твердыми частицами // Техническая физика. 2011. Вып. 10. Т. 81.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

**А.А. Кузьмин, кандидат педагогических наук, доцент;**

**Н.Н. Романов, кандидат технических наук, доцент.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.**

**Е.А. Калистова.**

**Главное управление МЧС России по Республике Марий Эл**

Сформирован алгоритм, который позволяет оперативно и точно провести расчет температурного режима пожара в помещении на основе применения стандартного программного продукта (Excel) для оценки огнестойкости ограждающих конструкций и получения исходных данных для решения задач планирования эвакуационных путей.

*Ключевые слова:* огнестойкость, граничные условия, нестационарная теплопроводность, теплофизические свойства, коэффициент теплоотдачи

## **OPTIMIZATION OF CALCULATION OF THE TEMPERATURE FIRE MODE IN THE INDOOR FOR THE ASSESSMENT OF THE FIRE RESISTANCE OF THE BUILDING CONSTRUCTIONS**

A.A. Kuzmin; N.N. Romanov.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia.

E.A. Kalistova. Main directorate of EMERCOM of Russia for the Republic of Mari El

An algorithm has been formed that allows you to quickly and accurately calculate the temperature regime of a fire in the room based on the use of a standard software product (Excel) to assess the fire resistance of building envelopes and obtain initial data for solving the problems of planning evacuation routes.

*Keywords:* fire resistance, boundary conditions, non-stationary thermal conductivity, thermophysical properties, heat transfer coefficient

Температурный режим пожара, то есть изменение температуры среды в помещении во времени зависит от множества факторов [1, 2], таких как геометрические характеристики помещения, количество и вид горючей нагрузки, ёмкость и т.д. Это дает возможность, зная характерные черты помещений различного функционального назначения, выделить общие закономерности развития пожара в этих помещениях.

Строительная конструкция теряет несущую способность при достижении критической температуры. Она зависит от материала конструкции, площади поперечного сечения, нагрузки и наличия огнезащитных покрытий.

Требования пожарной безопасности считаются выполненными в том случае, если фактический предел огнестойкости конструкции выше, чем требуемый.

Требуемый предел огнестойкости устанавливается нормативными правовыми актами и нормативными документами по пожарной безопасности в зависимости от класса функциональной пожарной опасности здания (помещения), пожарной опасности происходящих в них технологических процессов, высоты, площади пожарного отсека, этажности (Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»; СП 2.13130.2012 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты»).

Определение предела огнестойкости строительной конструкции может быть произведено путем натурных испытаний или расчетно-аналитическим путем.

Преимущества расчетно-аналитического метода: экономичность, возможность проверки различных вариантов решения, сравнительно низкие временные и трудозатраты, возможность определения предела огнестойкости строительных конструкций, проведение огневых испытаний которых не представляется возможным.

Например, для теплофизического расчета строительной конструкции, защищенной огнезащитным покрытием, расчетные методы позволяют решать как прямую задачу – определение времени, через которое будет достигнута критическая температура строительной конструкции, защищенной определенным слоем огнезащитного материала, так и обратную – определение необходимого слоя огнезащитного материала для обеспечения требуемого предела огнестойкости.

Изменение температурного поля внутри твердого тела описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},$$

где  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ , м<sup>2</sup>/с – коэффициент температуропроводности строительных материалов, зависящий от температуры.

Это уравнение дает возможность решать задачи, связанные с распространением тепла в теле теплопроводностью как при установившемся (стационарном), так и при неустановившемся (нестационарном) тепловом потоке.

При решении реальных задач дифференциальное уравнение дополняется начальными и граничными условиями, характеризующими каждую конкретную задачу.

При граничных условиях третьего рода:

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\alpha_1}{\lambda} (t_{f1} - t),$$

$$\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{\alpha_2}{\lambda} (t - t_{f2}),$$

температуры внутренней и наружной поверхностей стены определяются из соответствующих уравнений тепловых балансов для приграничных слоев ограждений:

$$c\rho s \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_1 (t_{f1} - t) + \lambda \frac{\partial t}{\partial x},$$

$$c\rho s \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} - \alpha_2 (t - t_{f2}),$$

где  $s$  – толщина приграничных слоев;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи со стороны продуктов горения:  $\alpha_1 = 11,63e^{0,0023\beta}$ ,  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи со стороны воздушной среды, рассчитываемый по классическим формулам.

Для горизонтального ограждения при движении тепла вверх (потолка) значение коэффициента теплообмена увеличивается на 30 %, а для горизонтального ограждения при движении тепла вниз (пола) значение коэффициента теплообмена уменьшается на 30 %.

Как видно, в определение коэффициента теплоотдачи со стороны греющей среды входит температура продуктов горения. Таким образом, прежде чем перейти к непосредственной оценке огнестойкости или выбору оптимальных параметров огнезащитного покрытия строительной конструкции, необходимо определиться с температурным режимом пожара. С этой целью, согласно методике [3], выполняется расчет температурного режима при пожаре в помещении соответствующего назначения. В качестве примера был проведен расчет температурного режима при пожаре в жилом (офисном) помещении, геометрические размеры которого, а также размеры оконных и дверных проемов, характеристики ограждающих конструкций и распределение пожарной нагрузки приведены в табл. 1, 2 и 3 соответственно.

Таблица 1. Геометрические размеры жилого (офисного) помещения

Длина помещения, м	5,2
Ширина помещения, м	4,1
Высота помещения, м	2,6

Таблица 2. Размеры оконных и дверных проемов

Площадь окна, м <sup>2</sup>	5,1
Высота верхней кромки окна, см	300
Высота нижней кромки окна, см	70
Высота двери, см	190
Ширина двери, см	90

Таблица 3. Пожарная нагрузка и материалы ограждений

Масса древесины, $R_{др}$ , кг	520
Коэффициент планировки помещения, $k$	0,9
Материал вертикальных стен	бетон на известняковом щебне
Толщина защитного слоя вертикальной стены, см	3
Толщина перекрытий, см	21
Материал перекрытий	бетон песчаный
Толщина защитного слоя перекрытия, см	38

Результаты вычислений занесены в табл. 4, и построены временные зависимости: среднеобъемной температуры продуктов горения; температуры на поверхности ограждающих конструкций; тепловых потерь через ограждающие конструкции и лучистых тепловых потерь через проемы; расходов продуктов горения и воздуха через оконные и дверные проемы.

Таблица 4. Результаты вычислений температурного режима

Номер временного интервала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время от начала пожара, мин	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
Температура продуктов горения, °С	50	286	586	896	801	630	452	288	179	107
Температура на обогреваемой поверхности вертикального ограждения, °С	10	143	256	372	474	519	478	438	399	372
Температура на поверхности пола, °С	25	36	108	340	492	553	538	490	401	327
Температура на поверхности потолка, °С	21	64	202	341	689	667	609	529	471	339
Тепловые потери через ограждающие конструкции, кВт	2	19	105	302	256	128	19,1			
Лучистые тепловые потери через проемы, кВт	29	277	977	2263	1715	216				

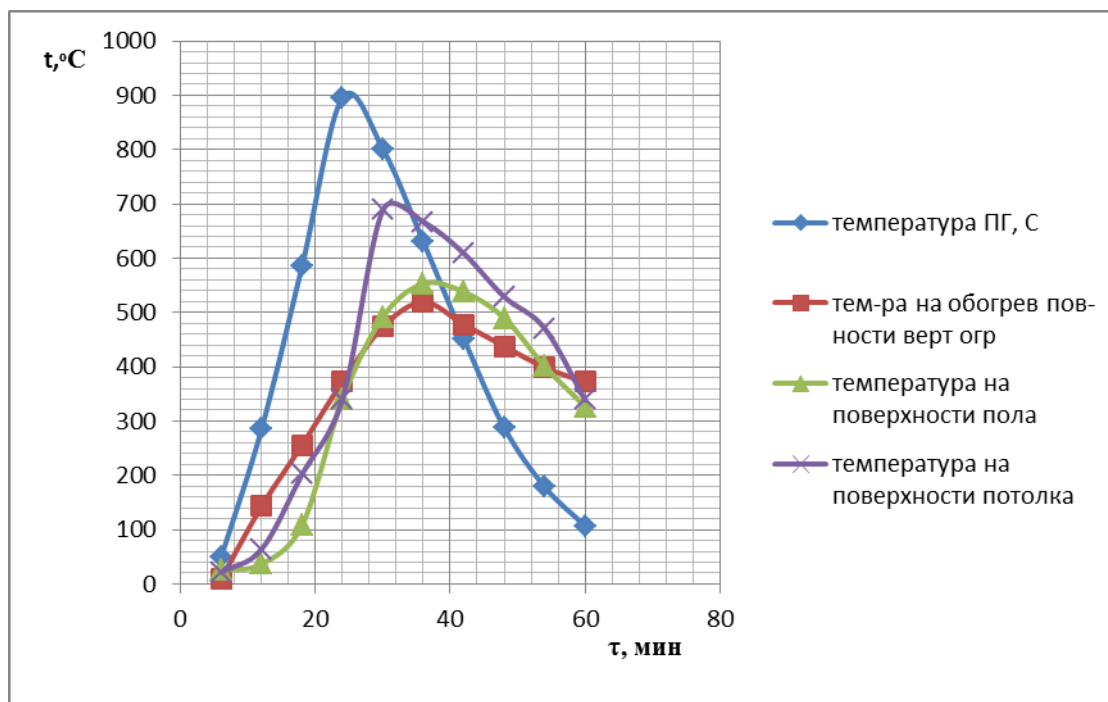


Рис. 1. Зависимости температур от времени

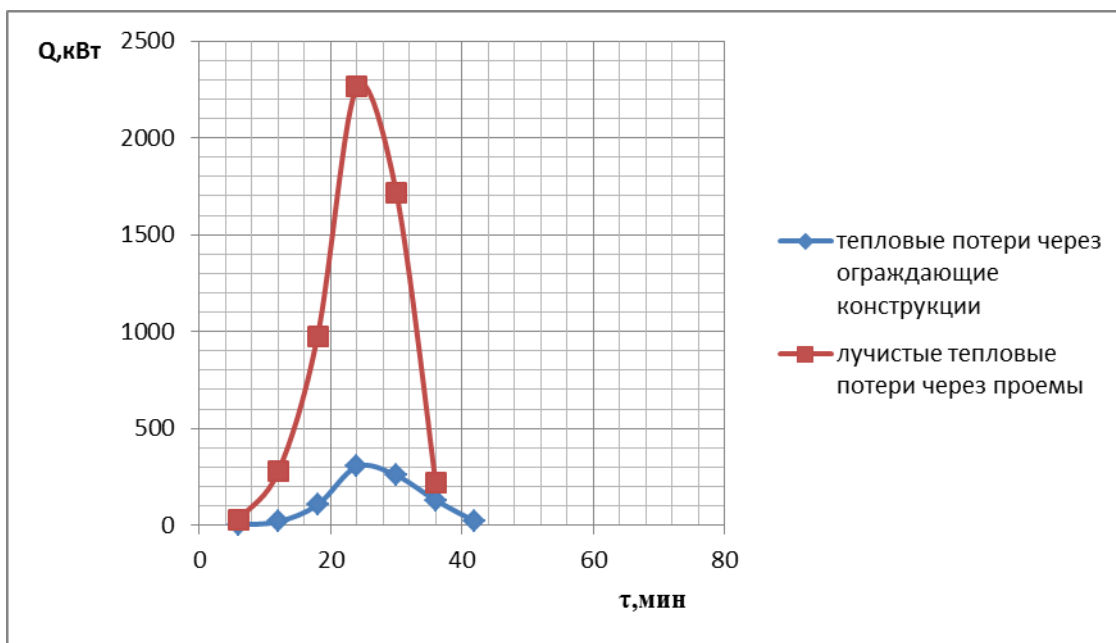


Рис. 2. Зависимости тепловых потерь от времени

Программная реализация расчета температурного режима пожара в помещении позволяет перейти к решению основной задачи – оценке влияния температурного режима пожара на огнестойкость строительных конструкций.

В практической деятельности для решения дифференциального уравнения теплопроводности совместно с начальными и граничными условиями, как правило, применяют численные методы, которые пригодны для тел сложной конфигурации, переменных граничных условий и зависимых от температуры теплофизических свойств материала объекта исследования. Одним из наиболее популярных методов является конечно-разностный метод решения задач нестационарной теплопроводности. Сущность метода конечных разностей состоит в замене дифференциального уравнения теплопроводности его конечно-разностным аналогом. При этом, во-первых, тело рассматривают состоящим из конечного числа слоев, а, во-вторых, непрерывное распределение температуры в теле заменяется ступенчатым как в пространстве, так и во времени.

Результаты расчетов по оценке огнестойкости ограждающих конструкций рассматриваемого помещения представлены на рис. 3–5.

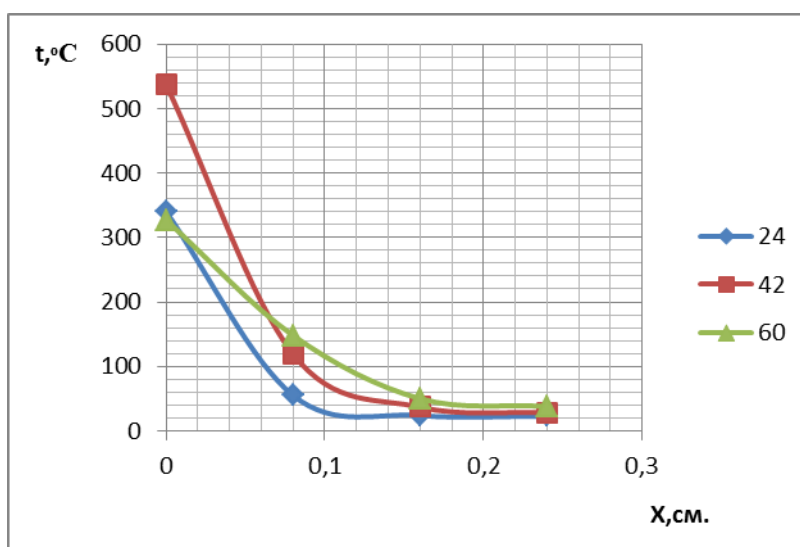


Рис. 3. Изменение температуры по толщине пола



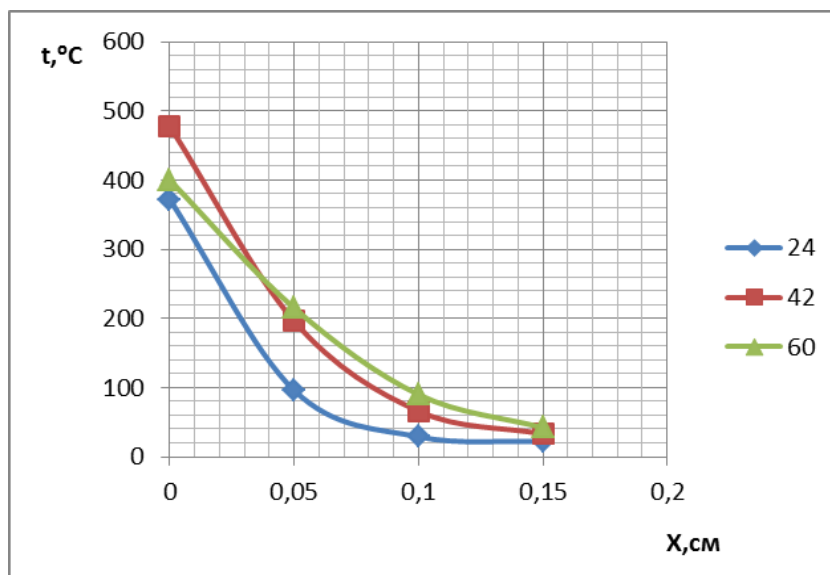


Рис. 4. Изменение температуры по толщине вертикальной стенки

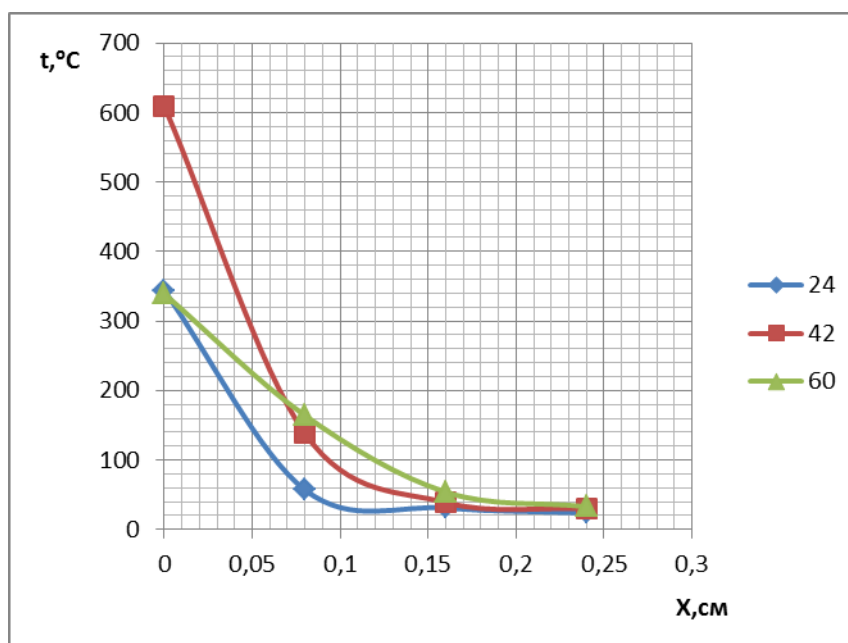


Рис. 5. Изменение температуры по толщине потолка

Результатом работы явилось создание специального модульного программного продукта, работающего в среде Microsoft Office Excel с применением Visual Basic for Applications и обеспечивающего оперативное редактирование исходных данных, которое позволяет подобрать материал и толщину строительной конструкции, а также оптимальную толщину огнезащитного покрытия для различных элементов конструкции.

### Литература

1. Методы расчета температурного режима в помещениях зданий различного назначения / Молчадский И.С. [и др.]. М.: ВНИИПО, 1983. 49 с.
2. Абросимов Ю.Г. Кошмаров Ю.А., Юн С.П. Моделирование температурного режима пожара в помещении // Пожарная опасность технологических процессов, зданий, сооружений и профилактика пожаров. Сборник научных трудов. М.: Изд-во ВИПТШ МВД СССР, 1988. С. 130–135.

3. ГОСТ Р 12.3.047–2012 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. Приложение П: «Методы расчета температурного режима пожара в помещениях зданий различного назначения» // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 21.02.2020).

## **СНИЖЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**А.В. Иванов, кандидат технических наук, доцент;  
И.Л. Скрипник, кандидат технических наук, доцент;  
С.В. Воронин, кандидат технических наук, доцент.  
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Рассмотрены вопросы генерации и методов защиты от статического электричества. На основании первого проведенного эксперимента показано, что при использовании в качестве нейтрализатора устройства с генератором переменного электрического сигнала, транспортируемые диэлектрические материалы стали менее подвержены электризации в трубопроводах из стекла и стали. Совместное применение заземлителя и разработанного нейтрализатора приводит к существенному снижению и стабилизации напряженности электрического поля при пневмотранспорте диэлектриков.

*Ключевые слова:* электризация, статическое электричество, установка, эксперимент, нейтрализация зарядов

## **REDUCTION OF STATIC ELECTRIFICATION OF MATERIALS UNDER ELECTROPHYSICAL INFLUENCE**

A.V. Ivanov; I.L. Skripnik; S.V. Voronin.  
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The issues of generation and methods of protection against static electricity are considered. On the basis of the first conducted experiment it is shown that when using as a neutralizer a device with an alternating electric signal generator, the transported dielectric materials become less susceptible to electrification in pipelines made of glass and steel. The joint use of the grounding conductor and the developed neutralizer leads to a significant reduction and stabilization of the electric field strength in the pneumatic transport of dielectrics.

*Keywords:* electrification, static electricity, installation, experiment, neutralization of charges

Современные технологические процессы, в которых используются новые виды сырья и увеличиваются скорости переработки и транспортирования диэлектриков, часто сопровождаются значительной статической электризацией. В производствах, связанных с применением легковоспламеняющихся, горючих веществ и материалов, искровые разряды статического электричества (СЭ) способны вызвать взрывы и пожары. В различных технологических процессах СЭ приводит к браку продукции, снижению производительности и выводу из строя производственного оборудования, увеличению энергозатрат производства. В некоторых случаях разряды СЭ могут неблагоприятным образом воздействовать на организм обслуживающего персонала [1].

Образование зарядов СЭ определяется возникновением двойного электрического слоя (рис. 1).

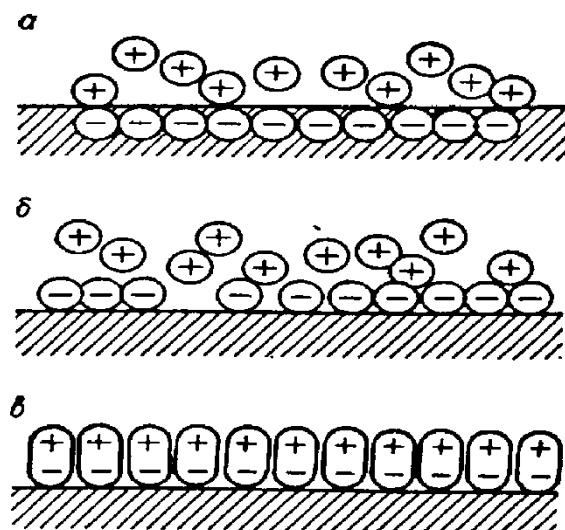


Рис. 1. Схема строения двойного электрического слоя: а – ионного; б – адсорбционного; в – ориентационного

Существуют различные методы защиты от СЭ (рис. 2).

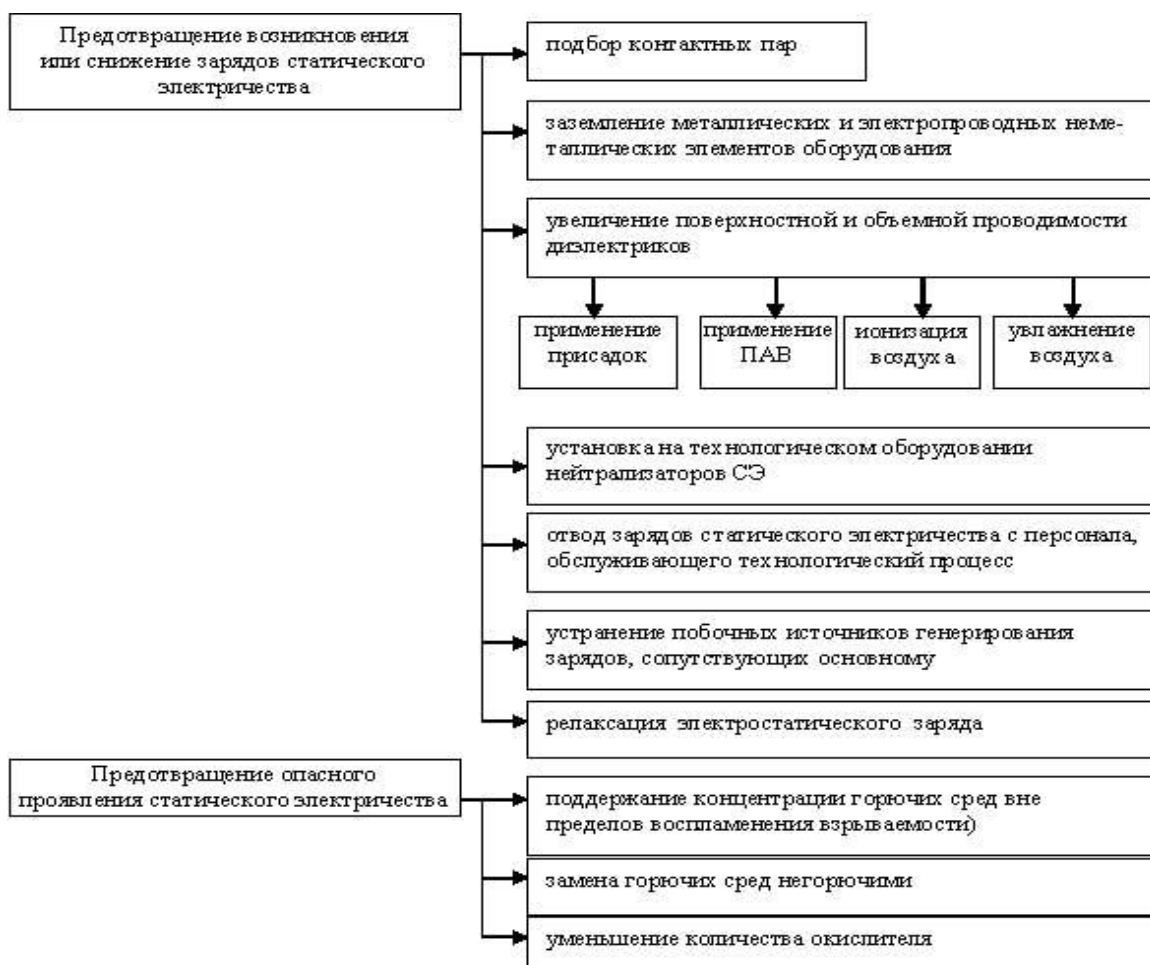


Рис. 2. Способы защиты от статического электричества

Одним из перспективных методов является снижение воздействия СЭ и его нейтрализация с использованием электрофизического воздействия в диэлектрике и на границе раздела фаз [2]. Для оценки эффективности данного метода проводились измерения на двух установках. В первой установке использовался источник электризации (система пневмотранспорта сыпучих диэлектриков) и генератор переменного электрического поля.

Исследуемый движущийся сыпучий материал генерировал статическое электрическое поле в пневмотрубопроводе. Далее от нейтрализатора СЭ подавался переменный электрический сигнал. В результате происходила поляризация частиц вещества, фиксировавшаяся с помощью электростатических вольтметров. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

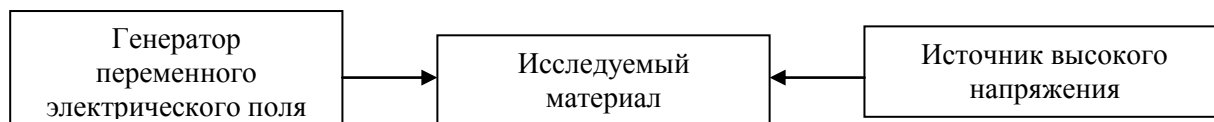


Рис. 3. Принципиальная схема исследовательской установки

В качестве материала трубопровода в эксперименте использовались строительное стекло и сталь X18H10T. Для каждого материала проводилось не менее пяти замеров.

В первом эксперименте была проведена предварительная обработка материалов переменным электрическим полем с последующей поляризацией. Результаты измерений представлены на рис. 4.

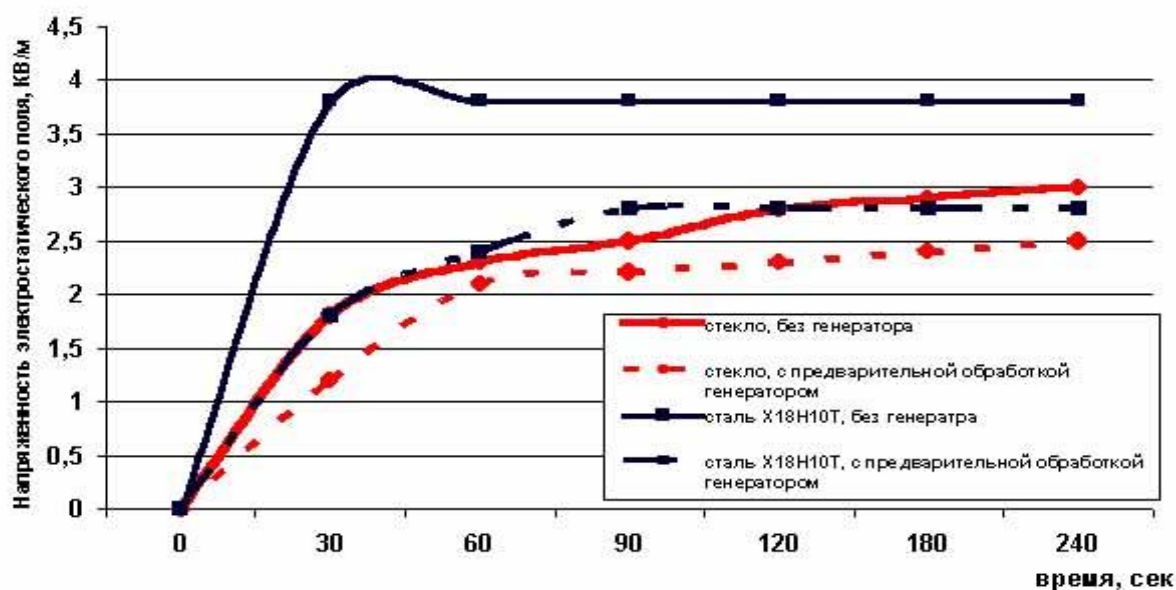


Рис. 4. Напряженность электрического поля при предварительной обработке материала

Из результатов видно, что подвергнутый предварительной обработке материал поляризуется в среднем на 30 % меньше, чем без обработки.

Во втором эксперименте проводилась поляризация материалов без предварительной обработки переменным электрическим полем. Была также проведена обработка стекла с увеличением площади контакта электрода прибора с поверхностью материала пневмотрубопровода (рис. 5).

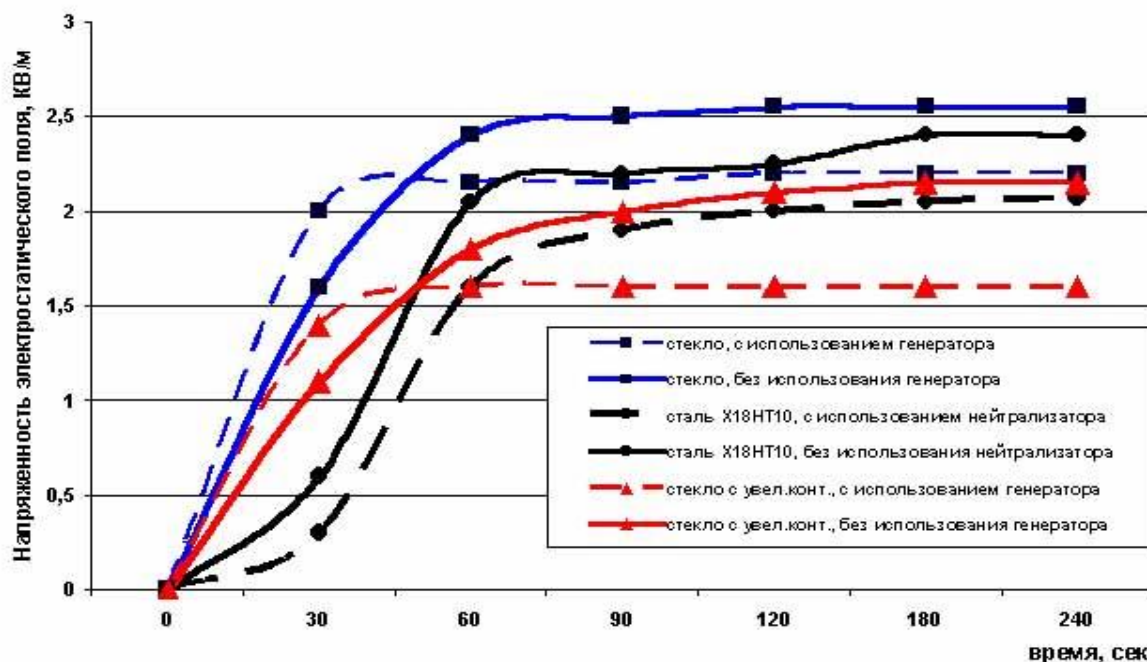


Рис. 5. Напряженность электрического поля без предварительной поляризации материала

Видно, что диэлектрический материал, на который воздействует генератор переменного электрического поля, поляризуется в среднем на 20 % для стекла и на 80 % для стали меньше, чем без обработки. При увеличении площади контакта между материалом и электродом генератора напряженность электрического поля снижается приблизительно на 25 % и 71 % соответственно.

В состав второй установки входил пневмотрубопровод, по которому двигались частицы диэлектрика, и бункер, в котором проводилось измерение создаваемой напряженности электрического поля, а также исследуемый нейтрализатор и измерительная аппаратура. Также бункер имел заземлитель, который используется согласно методике исследования. Схема установки показана на рис. 6.

Замеры напряженности электрического поля при пневмотранспорте диэлектриков проводились с помощью электростатического вольтметра.

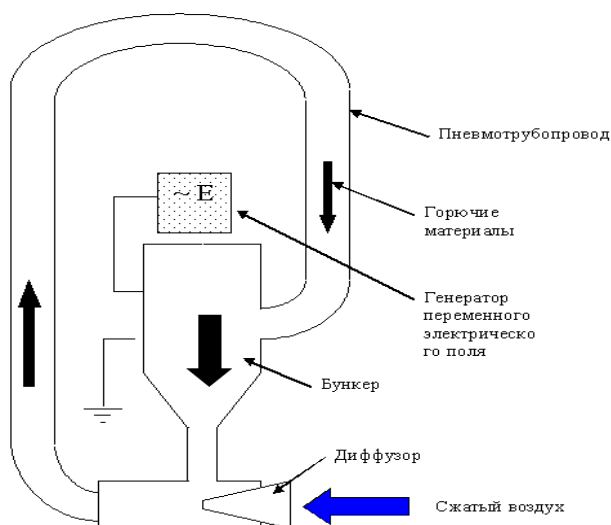


Рис. 6. Принципиальная схема лабораторной установки

При проведении исследования в бункере генерировалось электрическое поле наибольшей величины, затем к нему присоединялся заземлитель или включался нейтрализатор, и проводилось наблюдение за изменением электрического поля. В качестве диэлектриков использовался пенополистирол и овсяная крупка. На рис. 7 представлены результаты опытов, проводимых с пенополистиролом и заземлителем.



Рис. 7. Динамика изменения напряженности электрического поля, создаваемого пневмотранспортом с пенополистиролом

Напряженность электрического поля в бункере достигла своего пикового значения 6,12 В/см, а затем при включении заземлителя снизилась до 4,7 В/см и стабилизировалась на данном уровне.

На рис. 8 представлены результаты опытов, проводимых с овсяной крупкой и заземлителем.

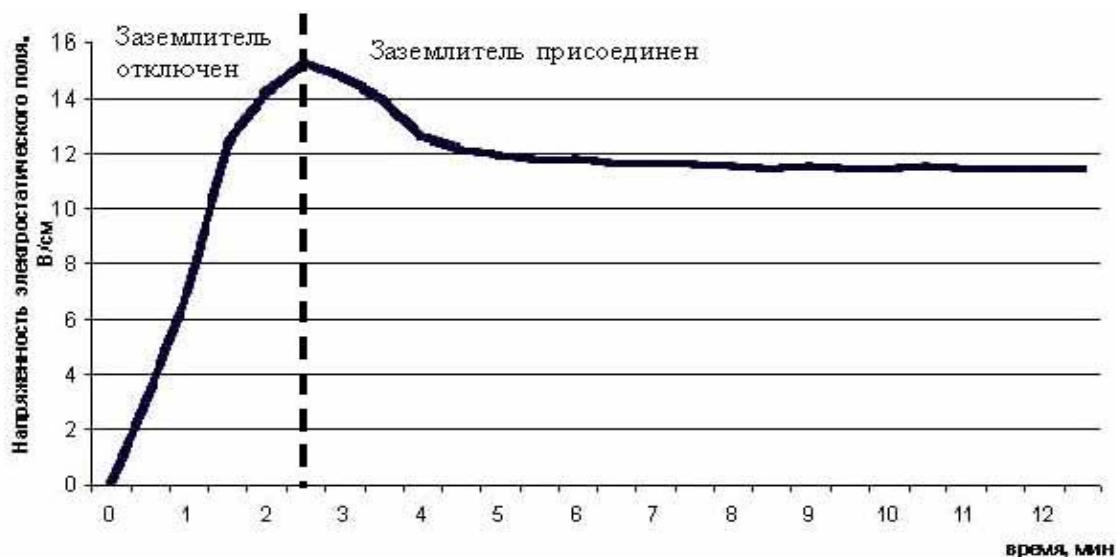


Рис. 8. Динамика изменения напряженности электрического поля, создаваемого пневмотранспортом с крупкой

Анализ эксперимента показал, что напряженность электрического поля в бункере достигла своего пикового значения 15,2 В/см, а затем при включении заземлителя снизилась до 11,4 В/см и стабилизировалась на данном уровне.

На рис. 9 представлены результаты опытов, проводимых с пенополистиролом и нейтрализатором.



Рис. 9. Динамика изменения напряженности электрического поля, создаваемого пневмотранспортом с пенополистиролом

Результаты расчета показали, что напряженность электрического поля в бункере достигла своего пикового значения 5,96 В/см, а затем при включении нейтрализатора снизилась до 1,7 В/см и стабилизировалась на данном уровне.

На рис. 10 представлены результаты опытов, проводимых с овсяной крупкой.



Рис. 10. Динамика изменения напряженности электрического поля, создаваемого пневмотранспортом с овсяной крупкой

В данном случае напряженность электрического поля достигла пикового значения 14,3 В/см и была снижена с помощью нейтрализатора до уровня 3,7 В/см.

Анализ проведенных исследований (рис. 7–10) показал, что нейтрализатор, генерирующий переменное электрическое поле, снижает его напряженность в установке в среднем в 2–3 раза по сравнению с заземлителями, традиционно используемыми для защиты оборудования от накопления электростатических зарядов.

Таким образом, использование генератора переменного электрического поля эффективно для нейтрализации статического электричества, образующегося при пневмотранспорте диэлектрических твердых горючих материалов при использовании трубопроводов из стекла и металла для снижения пожарного риска [3].

#### **Литература**

1. Статическое электричество в химической промышленности / Попов Б.Г. [и др.] / под ред. Б.И. Сажина. Изд. 2-е, пер. и доп. Л.: Химия, 1977. 240 с.
2. Способ и устройство управления физико-химическими процессами в веществе и на границе раздела фаз: пат. 2479005 Рос. Федерация / Ивахнюк Г.К. и др.; опублик. 10.04.13, Бюл. № 10.
3. Иванов А.В., Мифтахутдинова А.А., Скрипник И.Л., Шугаибов Р.А. Реализация технологии управления свойствами наноструктур в жидких углеводородах для снижения пожарного риска на объектах нефтегазового комплекса // Вестник Уральского ин-та ГПС МЧС России. 2019. № 2 (23). С. 49–58.

## **МЕТОДИКА И ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПРОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВКИ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА**

**Д.А. Минкин, кандидат технических наук, доцент;**

**М.С. Дахкильгов.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Рассмотрены вопросы обеспечения требуемого уровня температур углеводородного топлива при его транспортировке по трубопроводам. Рассмотрена конструкция кожухотрубного подогревателя, разработана методика расчета и программа для автоматизации процесса вычислений при определении температуры топлива, мощности нагревателей, их количества, температуры и площади поверхности теплообмена, направления движения теплоносителя и его теплофизических свойств. Проведено сравнение результатов вычислений с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* интенсивность теплообмена, кожухотрубный подогреватель, коэффициент теплоотдачи, теплообменный аппарат

## **METHODOLOGY AND PROGRAM FOR CALCULATING OF FLOW ELECTRICAL HEATERS FOR TRANSPORT SYSTEMS OF HYDROCARBONIC FUEL**

D.A. Minkin; M.S. Dahkilgov.

Saint-Petersburg university of the State fire service of EMERCOM of Russia

Article is devoted to problem of necessary level of temperature providing in case of hydrocarbonic fuel transporting down the pipes. Construction of shell and tube heater is considered, methodology and program for automation of calculating process are developed for definition of temperature, electricity power and heaters amount, heat transfer surface area, direction of fluid movement. Comparison of calculation results with experimental data was hold.

*Keywords:* heat transfer intensity, shell and tube heater, coefficient of convective heat transfer, heat exchanger



В настоящее время основная часть углеводородов в России добывается в удаленных северных регионах и транспортируется к потребителям через сеть трубопроводов, распределительных станций, систем подготовки газа, нефти и их производных. Сырье, поступающее из скважин, содержит в себе примеси, в том числе конденсат тяжелых углеводородов, пары воды, растворенный в нефти парафин. Конденсат оседает в нижних участках трубы, уменьшая проходное сечение. В условиях пониженных температур пары воды, содержащиеся в газе, приводят к образованию гидратов, представляющих собой белую снегообразную массу или лёд [1]. При понижении температуры нефти растворенный в ней парафин кристаллизуется, приводя к резкому увеличению её вязкости [2]. Возникающее в связи с этим увеличение гидравлического сопротивления затрудняет работу насосного оборудования и всей транспортной системы в целом, что может стать причиной полной её остановки в результате закупорки трубопровода. Наряду с ущербом, связанным с простоем оборудования, высока опасность разрушения трубопровода с последующим разливом топлива, пожарами и взрывами, нанесением экологического ущерба и существенными материальными затратами на устранение последствий аварий.

Для предупреждения возникновения таких ситуаций, наряду с осушкой природного газа, добавлением дорогостоящих ингибиторов и различных присадок, уменьшающих вязкость нефти и её производных, одним из наиболее эффективных методов является применение проточных подогревателей [3]. Для подогрева теплоносителя на нагреватели подается электрическая мощность, и выделившаяся в них теплота за счет вынужденной конвекции передается проходящему через корпус подогревателя газу или жидкости. При проектировании такого оборудования важно обеспечить требуемый уровень температуры нагреваемой среды и, в то же время, не допустить разогрева поверхностей нагревателей, контактирующих с топливом, выше значений температуры, регламентированных требованиями пожарной безопасности. Эти параметры зависят от множества факторов, наиболее существенными из которых являются расход и температура подогреваемого теплоносителя, его теплофизические свойства, размеры нагревателей, мощность тепловыделений, характер обтекания их потоком газа или жидкости.

В данной работе приведена методика и программа расчета необходимой электрической мощности, интенсивности конвективного теплообмена и максимальных значений температуры поверхности электрического нагревательного элемента для подогревателей различных размеров, мощности, предназначенных для различных газов и жидкостей.

### Конструкция подогревателя жидкостей и газов

Проточные нагреватели представляют собой цилиндрическую емкость с входным и выходным патрубком и помещенным в неё набором нагревательных элементов, равномерно распределённых по внутреннему объёму. Пример такой конструкции приведен на рис. 1.

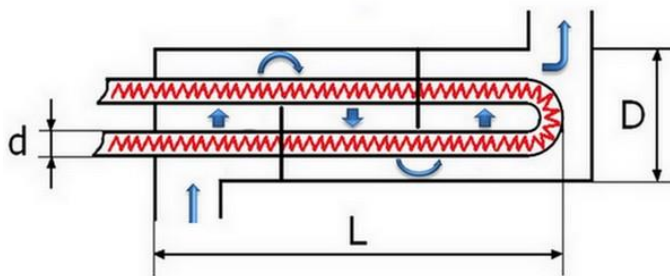


Рис. 1. Схема подогревателя с перегородками

Внутри кожуха диаметром  $D$  параллельно его продольной оси расположены трубчатые электрические нагреватели общей мощностью  $P$ . Каждый нагреватель имеет U-образную форму, длину  $L$  и диаметр  $d$ .

Нагреваемая среда поступает через входной патрубок внутрь подогревателя, проходит через него, нагреваясь до заданной температуры при непосредственном контакте с нагревательными элементами, и выходит через выходной патрубок. Для интенсификации теплообмена внутреннее пространство подогревателя может быть разделено на секции с помощью поперечных перегородок, обеспечивающих поперечное обтекание нагревателей потоком жидкости, как показано на рис. 1. В случае, если в конструкции перегородки отсутствуют, осуществляется продольное обтекание нагревателя.

Скорость обтекания нагревателей определяется диаметром кожуха  $D$ , числом нагревателей  $n$  и расстоянием между соседними перегородками  $h$ . При отсутствии перегородок теплоноситель движется вдоль поверхности нагревателей параллельно продольной оси (рис. 1).

Внешняя поверхность кожуха покрыта слоем теплоизоляционного термостойкого материала с низкой теплопроводностью для минимизации потерь тепловой энергии в окружающую среду.

Электрическая мощность, подводимая к нагревателю, выделяется в виде теплоты и расходуется на нагрев жидкости или газа. Для стационарных условий теплообмена значение суммарной мощности нагревателей может быть найдено с помощью выражения, построенного на основе закона сохранения энергии [4]:

$$P = cG(t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}),$$

где  $P$  – суммарная мощность тепловыделений, Вт;  $c$  – удельная теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении, Дж/кгК;  $G$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $t_{\text{вых}}$ ,  $t_{\text{вх}}$  – температуры теплоносителя на входе и выходе подогревателя, °С.

Мощность тепловыделений на одном нагревателе  $P_i$  и удельное ее значение  $q$ , Вт/м<sup>2</sup> можно найти из выражений (1) и (2), зная количество нагревателей  $n$  и площадь поверхности теплообмена  $A$ , м<sup>2</sup>:

$$P = nP_i; \quad (1)$$

$$q = \frac{P}{A}. \quad (2)$$

Максимальная температура поверхности нагревательного элемента  $t_{\text{max}}$  будет на выходе из подогревателя. Это обосновано тем, что теплоноситель в этой части подогревателя имеет наибольшую температуру, а интенсивность конвективного теплообмена уменьшается по мере прохождения жидкости по трубе. Значение температуры на выходе может быть найдено из соотношения:

$$t_{\text{max}} = t_{\text{вых}} + \frac{P}{\alpha A}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>\*К).

Коэффициент конвективного теплообмена зависит от большого числа параметров, в первую очередь от скорости течения теплоносителя, направления обтекания теплоотдающей поверхности и теплофизических свойств жидкости или газа. Для случая продольного обтекания нагревателя значение скорости жидкости  $v$  определяется по формуле [4]:

$$v = \frac{G}{\rho \frac{\pi}{2} (D^2 - nd^2)},$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $\rho$  – его плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  и  $d$  – диаметры кожуха и нагревателей, м;  $n$  – число нагревателей, шт.

При поперечном обтекании нагревательных элементов скорость потока теплоносителя в диаметральной плоскости определяется соотношением:

$$v = \frac{G}{\rho h(D - md)},$$

где  $m$  – число трубок нагревательных элементов в диаметральной плоскости;  $h$  – расстояние между соседними перегородками.

Зная скорость движения теплоносителя, его теплофизические свойства [5] и определяющий размер обтекаемого нагревателя, коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha$  может быть рассчитан по известным критериальным соотношениям для случаев продольного и поперечного обтекания цилиндра соответственно [6]. Полученное значение  $\alpha$  подставляется в формулу (3).

Для автоматизации процесса вычислений по представленной методике разработана программа «Расчет параметров кожухотрубных электрических подогревателей для жидкостей и газов». Алгоритм работы программы представлен на рис. 2.

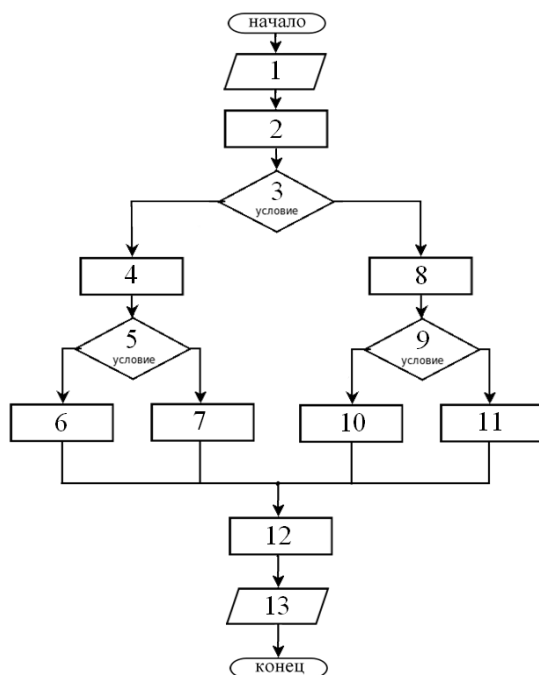


Рис. 2. Блок-схема программы:

**1** – ввод исходных данных, задающих параметры подогреваемой среды и конструкции подогревателя: плотность, удельная теплоемкость, кинематическая вязкость, теплопроводность, массовый расход, температура на входе и выходе, диаметр трубы, количество нагревателей, их диаметр и длина, количество перегородок; **2** – расчет: объемного расхода, площади поверхности теплообмена, суммарной мощности тепловыделений, плотности мощности тепловыделений; **3** – условный переход: выбор типа теплообменного аппарата – «без перегородок», «с перегородками»; **4, 8** – расчет для продольного или поперечного течения жидкости: скорости движения газа (жидкости), критериев Рейнольдса и Прандтля; **5, 9** – условный переход: ламинарный или турбулентный режим течения газа (жидкости) в зависимости от вычисленного значения критерия Рейнольдса для соответствующей конструкции подогревателя; **6, 7, 10, 11** – расчет коэффициента теплоотдачи по соответствующим режиму течения соотношениям; **12** – расчет температуры нагревателей; **13** – вывод результатов расчета: суммарная мощность нагревателей, удельная мощность нагревателей, коэффициент теплоотдачи, температура нагревателей и параметров, характеризующих характер конвективного теплообмена

Рабочее окно программы представлено на рис. 3. и представляет собой набор полей для ввода исходных данных и вывода результатов расчета, элементы для выбора типа подогревателя («с перегородками» и «без перегородок») и его схему, кнопку «Расчет».

Рис. 3. Рабочее окно программы

Поля для ввода/вывода данных собраны по группам: «Параметры среды», «Параметры подогревателя», «Результаты расчета». После запуска программы в полях для ввода исходных данных введены: давление среды 1 бар, температура жидкости на входе и выходе: -30 °C и 20 °C соответственно, расход 5,2 кг/с, диаметр трубы 0,4 м, количество нагревателей 48 шт., диаметр каждого из нагревательных элементов 0,016 м, погружная длина 2,5 м. Пользователь может вводить свои данные вместо указанных по умолчанию. Флажок, соответствующий позиции «без перегородок»/«с перегородками», меняет на рисунке справа схему подогревателя и методику расчета. Поля для ввода значений плотности, удельной теплоемкости, вязкости и теплопроводности остаются пустыми. Для их автоматического заполнения пользователь может выбрать жидкость, давление, задать температуры на входе и выходе из подогревателя. Если необходимо скорректировать данные, то в соответствующие поля можно вносить свои значения. При вводе исходных данных необходимо учитывать следующие ограничения: все величины, используемые в программе, имеют размерности системы «СИ», требуемые размерности приведены рядом с полем для ввода данных; кроме значений температуры, все вводимые величины должны быть больше нуля.

Для проверки работы программы был проведен расчет вариантов реально действующих конструкций кожухотрубных подогревателей. Подогреваемой средой в рассмотренных примерах являлись: природный газ при различных давлениях, объемных расходах, температурах и нефть. В таблице представлены исходные данные и результаты расчета, а также контрольное значение температуры  $t_{\text{контр}}$ , полученное экспериментально в соответствующих условиях.

Таблица. Результаты расчета мощности и температуры подогревателя

Продольное обтекание нагревателей (без перегородок)								
№	Среда	P, кВт	p, бар	G, н.м <sup>3</sup> /ч	t <sub>вх.</sub> , °С	t <sub>ввх.</sub> , °С	t <sub>max.</sub> , °С	t <sub>контр.</sub> , °С
1	Природный газ	397	60	26000	0	27	161	190
2	Природный газ	75	3	5902	-17	12	120	160
Поперечное обтекание (с перегородками)								
3	Нефть	80	40	2,5	10	74	108	97
4	Природный газ	61	45	2950	-20	18	158	185

Полученные расхождения значений  $t_{max}$  и  $t_{контр}$  обусловлены не только допущениями принятой тепловой модели, но и конструктивными отличиями в реально действующем оборудовании. Это связано с тем, что в модели все установленные нагревательные элементы внутри подогревателя считаются работающими, а в реальных конструкциях для повышения надежности дополнительно установлены запасные нагревательные элементы, которые включаются только в случае выхода из строя одного или нескольких действующих. Реальная скорость движения жидкости в таком случае оказывается меньше расчетной, что приводит к росту температуры поверхности.

В ходе работы разработана методика расчета и программа для автоматизации процесса вычислений при определении температуры поверхности, мощности и количества электрических нагревателей, площади поверхности теплообмена, направления движения теплоносителя и выборе его теплофизических свойств. Для оценки достоверности получаемых результатов выполнено сравнение результатов расчета с показаниями реально действующего оборудования, которое показало, что программа может быть рекомендована для использования при проектировании подогревателей углеводородного топлива.

### Литература

1. Рахматуллин Д.Р., Фахрисламова Э.Ш., Краснов А.Н. Обзор методов предупреждения гидратообразования в трубопроводах газовых промыслов // Электропривод, электротехнологии и электрооборудования предприятий: сб. науч. тр. конф. Уфа, 2015. С. 48.
2. Экспериментальное и теоретическое исследование микрокристаллизации парафинов в нефти / А.А. Кислицын [и др.] // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1. № 3. С. 15–21.
3. Мусакаев Н.Г., Уразов Р.Р. Превентивные методы борьбы с гидратообразованием в трубопроводах // Нефть и газ. 2006. № 1. С. 50–56.
4. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., исп. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 550 с.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
6. Теория тепломассообмена / С.И. Исаев [и др.]: учеб. для вузов / под ред. А.И. Леонтьева. 3-е изд., исп. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 462 с.

# КЛАССИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АТОМА И МАГНЕТИЗМ В ВОПРОСАХ ПОЖАРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТИЗ

**А.И. Трубилко, кандидат физико-математических наук.  
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

В рамках классической физики рассмотрена простая модель атома, которую можно использовать для объяснения магнитных свойств вещества.

*Ключевые слова:* классическая модель атома, пожарная экспертиза, магнетизм

## CLASSICALY ATOM MODEL AND MAGNETISM IN THE FIELD OF FIRE AND TECHNICAL EXPERTISE

A.I. Trubilko. Saint-Petersburg university of the State fire service of EMERCOM of Russia

The simple model of classical atom is considered. This model can be used to explain the magnetic properties.

*Keywords:* atom classical model, fire examination, magnetism

Формирование специалистов высокого уровня, в частности и инженеров пожарной безопасности, невозможно без знаний фундаментальных законов природы, которые изучаются предметами естественно-научного цикла. Именно поэтому последние относятся к основной базовой части программ обучения по любым направлениям технических специальностей. Следует отметить, что законы природы чаще всего могут быть применены не только к неживой природе, но и к живым организмам, и к обсуждению эволюции социумов в современном мире. В частности, достаточно упомянуть один из основополагающих физических принципов – принцип минимума энергии, согласно которому любая система всегда стремится занять наиболее выгодное состояние. Нетрудно заметить, что именно таким состоянием и является состояние системы с минимальной энергией. С помощью названного принципа происходит объяснение излучения энергии веществом, когда атом переходит с более высокого энергетического состояния в состояние с меньшей энергией, осуществляются ядерные реакции и др. Этим же принципом определяется эволюция любого живого организма, конечной стадией которого является состояние термодинамического равновесия с окружающей Вселенной или состояние «тепловой смерти». Этому же принципу следует и развитие человеческого социума в любой его стадии (строе) развития. Наконец, этому же принципу соответствуют и стадии развития звезд в наблюдаемых Галактиках и всей нашей наблюдаемой Вселенной в целом. Здесь этот маленький пример приводится, чтобы еще раз напомнить о важности изучения фундаментальных законов природы для понимания и объяснения окружающих явлений и процессов.

В работах [1–4] сделана попытка объяснения различных явлений и процессов, имеющих отношение к безопасности жизнедеятельности и техносферной безопасности, на примере простых задач разделов «Механика» и «Электричество». В частности, на основе решения физических задач рассмотрены вопросы безопасности движения, безопасности работы на лестницах, безопасности работы с веревками при проведении спасательных работ. Также были рассмотрены важные законы электростатики и протекания электрического тока для объяснения явления электростатического пробоя и короткого замыкания в цепи, являющиеся основными причинами пожаров. В этих работах, подчеркивается тот факт, что основой безопасности жизнедеятельности в любых его проявлениях является соблюдение и следование объективным законами природы. Этот принцип должен, на взгляд авторов, быть основополагающим для любого вида деятельности. Любые попытки его нарушения

неизменно приводят к трагическим исходам. Следует помнить, что затраты на профилактику неизменно меньше, чем затраты на устранение таких последствий.

В данной статье будет затронута тема, которая, на взгляд авторов, значительно обделена в стандартных курсах, а именно – изучение магнитного поля в веществе. Именно эта тема имеет фундаментальное значение в некоторых вопросах пожарной экспертизы [5]. На основе ее понятий и явлений разработаны основной и вспомогательный методы обнаружения источника пожара. Эти методы используют методики определения очага пожара посредством приборов, позволяющих провести экспресс анализ и определить, наряду с другими методами, место локализации пожара. Так, вспомогательным методом экспертизы может служить каппаметрия, использующая измерение магнитной восприимчивости некоторых конструкций из бетона и оштукатуренных поверхностей. К сожалению, этот метод имеет существенные ограничения, связанные с необходимостью иметь в составе конструкций биотит. Последний входит составной частью не во все марки используемых бетонов и, кроме того, зависит от региона изготовления, в частности, в Санкт-Петербурге его практически не используют. Основным методом является использование коэрцитиметрии, позволяющей определить величину коэрцитивной силы холоднодеформированных стальных конструкций типа гвоздей, болтов, шурупов и пр. В быстропротекающем эксперименте осуществляется измерение тока размагничивания образца в цикле намагничивание-размагничивание. Величина этого тока пропорциональна коэрцитивной силе, которая, в свою очередь, зависит от температуры, в которой образец находился. Подчеркнем, что с физической точки зрения как сами магнитные характеристики образца, так и способы и методы их определения связаны с задачей о поведении атома во внешнем магнитном поле. Последнее, в свою очередь, так же определяется внутренней структурой образца и, следовательно, свойствами атомов и молекул его образующего. Поэтому основой изучения магнитного взаимодействия является модель атома, которая в рамках классической физики представляет собой обычный круговой ток. Как известно, такая модель, хотя и не до конца корректная с позиций современной физики, вместе с тем оказывается чрезвычайно полезной с концептуальной точки зрения и с некоторыми ограничениями позволяет рассмотреть основы формирования внутренней структуры магнетика. Определяются характеристики магнитного поля самого атома на основе классического рассмотрения, рассматривается задача о его взаимодействии во внешнем магнитном поле. В последнем случае, делая разумные оценки на основе опытных данных, показана возможность возникновения у атома, наряду с собственным магнитным моментом, орбитального движения электрона, магнитного момента, связанного с прецессионным движением орбиты как целого во внешнем магнитном поле.

В классической физике атом любого элемента является электронейтральным. Его положительный заряд сосредоточен в ядре, а отрицательный заряд определяется электронами, число которых в точности равно числу протонов ядра. Электроны являются материальными точками, имеющими заряд  $e$  и массу  $m$ , и вращаются вокруг неподвижного ядра по круговым орбитам. Движение электрона по орбите представляет собой электрический ток. Поэтому электрон, вращающийся по орбите, создает магнитное поле, что приводит к появлению магнитного момента атома.

В рамках классической модели возможное наличие магнитного момента атома обусловлено только движением электронов по орбите, что и является единственным фактором, определяющим поведение атома в магнитном поле. Рассмотрим атом водорода, в состав которого входит один протон и движущийся вокруг него по круговой орбите радиуса  $r$ , один электрон (рис. 1).

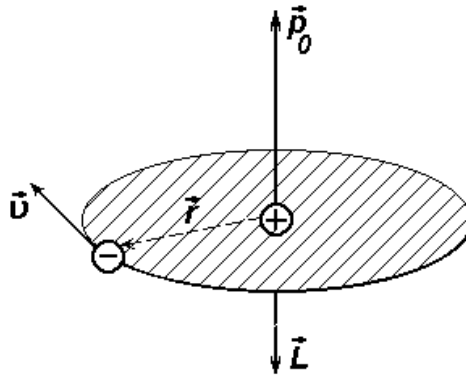


Рис. 1. Классическая модель атома водорода

Сила тока кругового витка, обусловленного движением электрона по орбите равна:

$$I = e\nu = e \cdot \frac{1}{T} = \frac{e\nu}{2\pi r},$$

где  $T$  – период вращения;  $\nu$  – линейная скорость электрона.

В атоме водорода электрон вращается вокруг ядра с частотой, равной примерно  $\nu \approx 10^{14} \text{ c}^{-1}$ . Поэтому сила кругового тока равна  $I \approx 10^{-5} \text{ A}$ .

Магнитный момент электрона, обусловленный вращением вокруг ядра, очевидно, равен:

$$p_0 = IS = \frac{e}{T} \pi r^2 = \frac{e\nu r}{2}.$$

Направление вектора  $\vec{p}_0$  определяется правилом правого винта, но поскольку электрон – отрицательно заряженная частица, то направление вектора магнитного момента именно такое, как указано на рис. 1. Данный магнитный момент принято называть орбитальным магнитным моментом электрона.

Движущийся по круговой орбите электрон обладает также и механическим моментом импульса:

$$\vec{L}_0 = \vec{r} \times m\vec{\nu},$$

где  $\vec{r}$  – радиус орбиты;  $m$  – масса электрона;  $\vec{\nu}$  – его линейная скорость. Вектор  $\vec{L}_0$  направлен противоположно вектору  $\vec{p}_0$ , а его величина равна:

$$L_0 = r m \nu = r m \omega r = m \frac{2\pi}{T} r^2.$$

Теперь найдем отношение магнитного момента электрона к его механическому моменту количества движения:

$$\gamma = \frac{p_0}{L_0} = -\frac{1}{2} \frac{e}{m}. \quad (1)$$

Это отношение называется гиромангнитным (магнитомеханическим) отношением орбитальных моментов электрона. Гиромангнитное отношение указывает на наличие



фундаментальной связи между магнитными и механическими свойствами магнетика, поскольку изменение его магнитных свойств приводит к изменению и его механических свойств, а также и наоборот.

Однако в опытах значение гиромагнитного отношения оказалось примерно в два раза больше, чем это следует из уравнения (1). Этот факт удается объяснить наличием у электрона собственного внутреннего механического момента количества движения, который получил название спин электрона. Было показано, что значение собственного гиромагнитного отношения для электрона в атоме равно:

$$\gamma_e = -\frac{e}{m}.$$

Весь ход развития современной физики полностью подтвердил гипотезу о спине, под которым понимают внутреннее свойство самого электрона, такое же как, например, его масса и заряд.

Таким образом, полный механический момент электрона  $\vec{L}$  представляет векторную сумму орбитального механического момента электрона и его спина (собственного механического момента)  $\vec{L} = \vec{L}_0 + \vec{S}$ . Полный магнитный момент электрона  $\vec{p}_m$  также представляет собой векторную сумму магнитного момента электрона из-за его орбитального движения и собственного магнитного момента электрона  $\vec{p}_m = \vec{p}_0 + \vec{S}_m$ .

У атома водорода всего один электрон, у других химических элементов количество электронов определяется зарядовым числом  $Z$ . В этом случае магнитный момент атома равен векторной сумме магнитных моментов всех электронов его составляющих:

$$\vec{P}_a = \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{m,i},$$

где  $\vec{p}_{m,i}$  – полный магнитный момент  $i$ -го электрона.

Поведение атома во внешнем магнитном поле индукцией  $\vec{B}_0$  с точки зрения описания в рамках классической физики является сложным. Рассмотрим его поведение в магнитном поле вновь на примере поведения самого простого элемента – водорода. Рассмотрим рис. 2. Здесь индукция магнитного поля и магнитный момент атома направлены вдоль одной прямой.

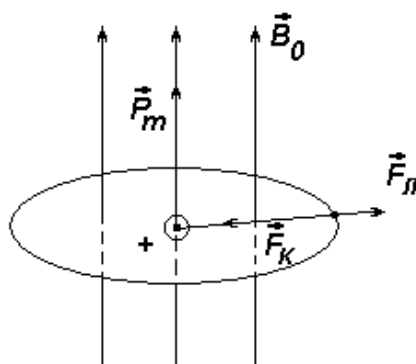


Рис. 2. Поведение атома водорода в однородном магнитном поле

Пусть первоначально магнитное поле отсутствует. В этом случае на электрон, вращающийся по орбите, действует только кулоновская сила со стороны ядра. Уравнение движения электрона имеет следующий вид:

$$\frac{m\nu_0^2}{r_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_0^2}. \quad (2)$$

В условиях существования внешнего магнитного поля на вращающийся вокруг ядра электрон кроме силы Кулона будет действовать еще и сила Лоренца, направленная вдоль радиуса. В зависимости от взаимного направления вектора линейной скорости  $\vec{v}$  и вектора  $\vec{B}_0$  сила Лоренца может быть направлена либо к центру, либо от центра окружности. Наличие силы Лоренца приведет к изменению характеристик движения электрона по круговой орбите. Выясним характер этих изменений для случая, показанного на рис. 2. Уравнение движения электрона примет достаточно простой вид:

$$\frac{m\nu^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} - eB_0\nu, \quad (3)$$

где  $r$  и  $\nu$  – новые значения радиуса орбиты и скорости электрона.

Изменение этих характеристик движения приведет к изменению орбитального магнитного момента.

Так, изменение силы тока при изменении параметров орбиты можно определить следующим выражением:

$$\Delta I = I - I_0 = I_0 \left( \frac{I}{I_0} - 1 \right) = I_0 \left( \frac{\nu}{\nu_0} \cdot \frac{r_0}{r} - 1 \right). \quad (4)$$

А изменение магнитного момента:

$$\Delta p = IS - I_0 S_0 = I_0 S_0 \left( \frac{I}{I_0} \cdot \frac{r^2}{r_0^2} - 1 \right) = I_0 S_0 \left( \frac{\nu}{\nu_0} \cdot \frac{r}{r_0} - 1 \right).$$

Величины с нижним индексом «0» соответствуют их значениям в отсутствии магнитного поля. Вычислить отдельно скорость и радиус орбиты оказывается невозможно, так как есть лишь одно уравнение (3). Поэтому, прежде всего, необходимо выяснить, насколько сильно могут измениться эти величины. В данном случае параметром задачи является величина, равная отношению силы Лоренца к силе Кулона:

$$\frac{F_L}{F_K} = \frac{eB_0 r_0}{m\nu_0}.$$

Для оценки возьмем значения  $r_0 \approx 10^{-10}$  м,  $\nu \approx 5 \cdot 10^6$  м/с, а величину  $B_0 \approx 10$  Тл. В результате имеем:

$$\frac{F_L}{F_K} \approx \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^{-10}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 5 \cdot 10^6} \approx 3 \cdot 10^{-5}.$$

Это означает, что изменения радиуса орбиты и скорости электрона будут незначительными.

Если в качестве первого приближения предположить, что радиус орбиты не меняется, то для скорости из уравнения (3) имеем следующее квадратное уравнение:

$$v^2 + \frac{eB_0 r_0}{m} v - v_0^2 = 0,$$

одно из решений которого имеет вид (второе решение в данном случае не имеет физического смысла):

$$v = -\frac{1}{2} \frac{eB_0 r_0}{m} + \sqrt{v_0^2 + \frac{1}{4} \frac{e^2 B_0^2 r_0^2}{m^2}}.$$

Учитывая результаты оценок, для изменения скорости получаем:

$$v = v_0 + \Delta v \approx -\frac{1}{2} \frac{eB_0 r_0}{m} + v_0 + \frac{1}{8} \frac{e^2 B_0^2 r_0^2}{m v_0^2}.$$

Окончательно изменение линейной скорости электрона с хорошей степенью точности равно:

$$\Delta v = -\frac{1}{2} \frac{eB_0 r_0}{m}.$$

В этом случае линейная скорость электрона уменьшится. Также уменьшится и угловая скорость вращения электрона на величину, равную:

$$\omega_L = \frac{\Delta v}{r_0} = -\gamma B_0.$$

Если соотношение между векторами  $\vec{B}_0$  и  $\vec{v}$  таково, что сила Лоренца направлена к центру окружности, то нетрудно показать, что изменение скорости и частоты будет той же величины, но положительным.

Теперь можно оценить изменение радиуса орбиты, учитывая при этом то, что  $\Delta v \ll v_0$ . Разделим уравнение (3) на (2), в итоге имеем:

$$\frac{v^2}{v_0^2} \cdot \frac{r_0}{r} - \frac{r_0^2}{r^2} = -\frac{eB_0 r_0}{m v_0} \cdot \frac{v}{v_0}. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволит найти изменение радиуса орбиты. На первый взгляд, в силу малости слагаемого в правой части им можно было бы пренебречь и найти изменение радиуса. Однако это привело бы к серьезной качественной ошибке, выражающейся в расхождении с опытом. Обратим внимание, что слагаемые в левой части (5) по порядку величины мало отличаются от единицы. Поэтому их разность будет малой величиной и, вполне возможно, сравнимой с правой частью уравнения. Отсюда и следует, что сразу пренебречь слагаемым в правой части нельзя. Решение данного квадратного уравнения дает для отношения  $\frac{r_0}{r}$  следующее выражение:

$$\frac{r_0}{r} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{v_0^2} + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \frac{v^4}{v_0^4} + \frac{eB_0 v r_0}{m v_0^2}} \approx \frac{v^2}{v_0^2} + \frac{eB_0 r_0}{m v_0} \cdot \frac{v_0}{v}.$$

Воспользовавшись этим выражением, для отношения  $\frac{\Delta I}{I_0}$  из (4) получим:

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \left( \frac{v^3}{v_0^3} - 1 + \frac{eB_0 r_0}{m v_0} \right) = 3 \frac{v_0^2}{v_0^3} \cdot \Delta v + \frac{eB_0 r_0}{m v_0}.$$

При выводе этого соотношения ограничились членами первого порядка малости. Теперь воспользуемся выражением для величины  $\Delta v$  и окончательно получим:

$$\Delta I = -\frac{e^2}{4\pi} \cdot \frac{B_0}{m}.$$

Аналогичным способом выражение для изменения магнитного момента, имеет вид:

$$\Delta p = -\frac{1}{4} \cdot \frac{e^2 B_0 r_0^2}{m}.$$

Теперь можно полагать, что радиус орбиты остается постоянным. Значит в магнитном поле параметры орбиты электрона, вращающегося по орбите вокруг ядра, испытывают незначительные изменения. Прежде всего, меняется частота вращения электрона вокруг ядра, а радиус орбиты остается практически постоянным, в этом случае линейная скорость электрона уменьшается. Также уменьшится и его угловая скорость вращения на величину, равную:

$$\omega_L = \frac{\Delta v}{r_0} = -\gamma B_0,$$

которая называется ларморовской частотой, ее величина в широком диапазоне значений магнитной индукции значительно меньше собственной частоты вращения электрона по орбите. Если соотношение между векторами  $\vec{B}_0$  и  $\vec{v}$  таково, что сила Лоренца направлена к центру окружности, то изменение скорости и частоты будет той же величины, но положительным.

Была рассмотрена ситуация, когда магнитный момент атома и вектор магнитной индукции внешнего поля направлены вдоль одной прямой. Это рассмотрение проведено в инерциальной системе отсчета. В то же время полезно рассмотреть это влияние с точки зрения наблюдателя, находящегося в системе координат, вращающейся с угловой скоростью  $\omega$  относительно оси, проходящей через центр орбиты и направленной вдоль вектора  $\vec{B}_0$ . Эта система уже не будет инерциальной и поэтому, кроме двух уже известных сил, следует добавить центробежную силу инерции  $m\omega^2 r$  и силу Кориолиса  $2m [\vec{v} \times \vec{\omega}]$ . Если угловая скорость вращения системы отсчета  $\omega \ll \omega_0$  ( $\omega_0$  – угловая скорость вращения электрона по орбите), а  $v \approx v_0$ , то центробежной силой инерции можно пренебречь по сравнению с кориолисовой силой. В этом приближении получаем простое выражение для силы Кориолиса:

$$\vec{F}_K = 2m [\vec{v}_0 \times \vec{\omega}].$$

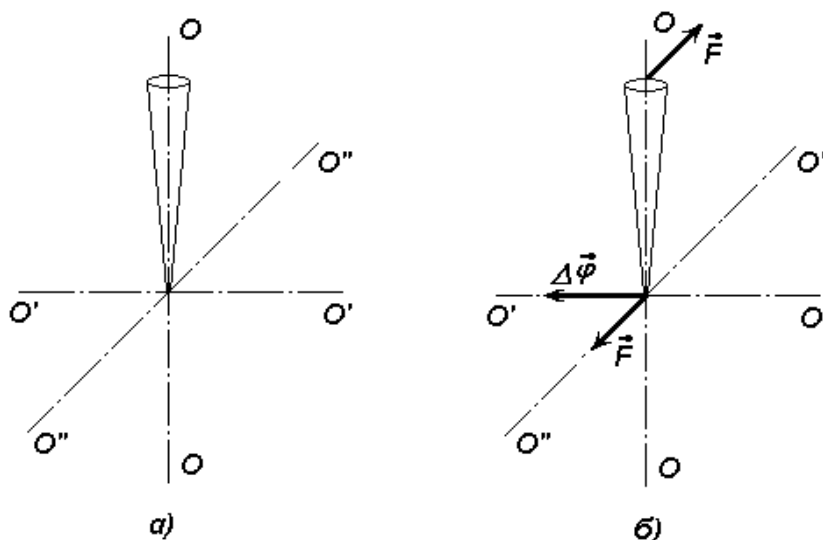
Нетрудно убедиться, что эта сила направлена вдоль радиуса орбиты в сторону, противоположную силе Лоренца. Так как доказано, что параметры орбиты остаются неизменными, это означает, что силы Кориолиса и Лоренца численно равны друг другу:

$$2m\nu_0\omega \cdot \sin\left(\vec{\nu}_0, \hat{\vec{\omega}}\right) = e\nu_0 B \cdot \sin\left(\vec{\nu}_0, \hat{\vec{B}}_0\right).$$

Этот факт означает, что если система вращается с частотой  $\omega_L = \frac{e}{2m}B_0$ , то в этой системе отсчета движение электрона будет таким же, как и в отсутствии магнитного поля.

Чаще всего, внешнее магнитное поле  $\vec{B}_0$  составляет некоторый угол с орбитальным магнитным моментом электрона  $\vec{p}_0$ . Таким образом, в системе отсчета, вращающейся с ларморовской частотой вокруг оси, проходящей через ядро атома и параллельной вектору магнитной индукции, на вращающийся электрон действует лишь кулоновская сила. Рассмотрим движение электрона, магнитный момент которого составляет некоторый угол с вектором  $\vec{B}_0$  в инерциальной системе отсчета. В этом случае движение электрона в этой системе отсчета находится как результат сложения его движения в самой неинерциальной системе и движения неинерциальной системы относительно инерциальной. В данном случае движение электрона по орбите за счет кулоновской силы складывается с вращением неинерциальной системы отсчета.

Одним из принципов классической физики является стремление к наглядности. В частности, это означает, что предпринимаются попытки найти некую механическую аналогию явлению, которое в реальности наблюдать невозможно. Это относится и к движению электрона по орбите. Например, рассматривая поведение атома в магнитном поле с произвольной ориентацией магнитного момента, используются механические аналогии, полагая, в частности, что движущийся по орбите электрон подобен волчку или гироскопу, то есть массивному симметричному телу, вращающемуся с большой скоростью относительно оси симметрии (рис. 3).



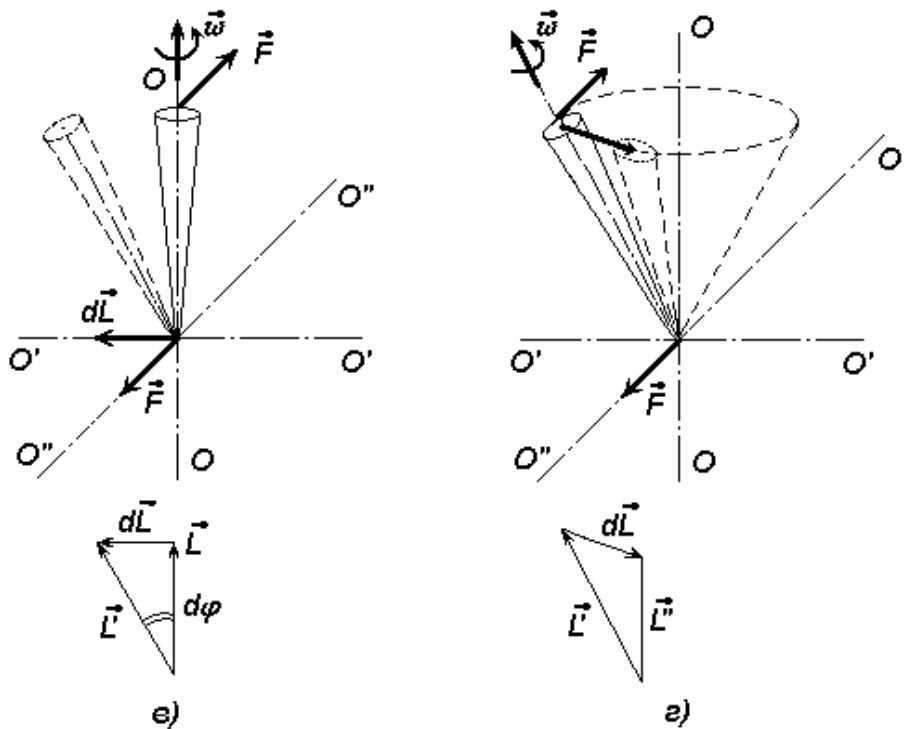


Рис. 3. Прецессия волчка:

покоящееся тело в положении неустойчивого равновесия (а); момент внешней пары сил вызывает поворот неподвижного тела относительно оси  $OO'$  на угол  $\Delta\varphi$  (б); действие пары сил на быстро вращающееся тело (волчок). Тело поворачивается под действием момента сил.

Это приводит к изменению его момента количества движения на величину  $d\vec{L}$  (в); прецессия волчка, ось волчка движется по боковой поверхности конуса (г)

Представим, что тело не вращается и находится в положении равновесия. Это положение равновесия оказывается неустойчивым и любая сила, приложенная к неподвижному телу, выведет его из состояния равновесия. Предположим, что на тело действует пара сил, показанных на рис. 3. Тогда неподвижное тело будет поворачиваться относительно оси  $O'O'$ . Теперь приведем волчок в быстрое вращение вокруг оси  $OO$ . Вновь приложим такую же пару сил. Опыт показывает, что волчок не падает, а его ось начинает поворачиваться вокруг оси  $O''O''$  (рис. 3, а). Это, на первый взгляд, странное поведение волчка хорошо объясняется законами динамики вращательного движения. Действительно, момент сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  направлен вдоль оси  $O'O'$  (рис. 3, б). Уравнение моментов имеет вид:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M} \Rightarrow d\vec{L} = \vec{M}dt.$$

Заметим, что вектор  $d\vec{L}$  перпендикулярен вектору  $\vec{L}$ . Через бесконечно малый интервал времени  $dt$  момент импульса волчка станет равным  $\vec{L}' = \vec{L} + \vec{M}dt$ . Этот новый вектор лежит в плоскости рисунка. Его направление совпадает с новым направлением оси волчка. Малый угол поворота  $d\varphi$  равен:

$$d\varphi = \frac{dL}{L} = \frac{M}{L} dt.$$

Отсюда следует, что этот поворот произошел с угловой скоростью  $\omega'$ , равной:

$$\omega' = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{M}{L}.$$

Так как векторы  $\vec{\omega}'$ ,  $\vec{M}$ ,  $\vec{L}$  взаимно перпендикулярны, нетрудно записать:

$$\vec{M} = [\vec{\omega}' \times \vec{L}]$$

В процессе вращения волчка вертикальная плоскость, проходящая через его ось, повернется на угол  $d\varphi$  и на такой же угол, но в горизонтальной плоскости, повернется вектор  $\vec{M}$ . В результате, через интервал времени  $dt$  взаимное расположение векторов  $\vec{L}$  и  $\vec{M}$  сохранится. За последующий короткий интервал времени  $dt$  вектор  $\vec{L}$  получит такое же приращение  $d\vec{L}$ , которое будет перпендикулярно вектору  $\vec{L}$ . В итоге ось волчка будет поворачиваться вокруг вертикальной оси  $OO$  с угловой скоростью  $\omega'$ . Такое движение называется прецессией. Прецессия – явление, при котором ось вращающегося объекта поворачивается, например, под действием внешних моментов.

Эти соображения можно применить к описанию орбитального движения электрона в магнитном поле. Действительно, быстро вращающийся по орбите электрон можно уподобить волчку. Пусть механический момент электрона составляет некоторый угол с направлением вектора  $\vec{B}_0$ . Тогда этот вектор  $\vec{B}_0$  можно разложить на две составляющие: одна направлена вдоль вектора  $\vec{L}$ , а другая – вдоль радиуса. Последняя составляющая создает момент силы относительно оси, вдоль которой расположен вектор  $\vec{B}_0$ . В результате можно воспользоваться предыдущими рассуждениями и сделать следующий вывод: при наложении однородного магнитного поля  $\vec{B}_0$ , уравнения движения системы электронов в атоме сохраняют свою форму, если перейти к системе координат, равномерно вращающейся вокруг направления поля с угловой частотой  $\omega_L = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m} B_0$ . Таким образом, в классической физике единственным результатом влияния магнитного поля на орбиту электрона в атоме является прецессия орбиты и вектора орбитального магнитного момента с угловой скоростью  $\omega_L$  вокруг оси, проходящей через ядро атома, параллельной вектору магнитной индукции (рис. 4). Данное утверждение и является теоремой Лармора.

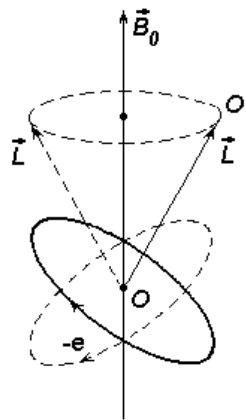


Рис. 4. Прецессия электрона (с зарядом  $-e$ ) в магнитном поле.  
Орбита  $OO'$  описывает конус вокруг направления  $\vec{B}_0$

Прецессия орбиты электрона представляет собой дополнительный круговой ток  $\Delta I_{orb}$ , величина которого определяется ларморовской частотой:

$$\Delta I_{orb} = \frac{e}{T_L} = \frac{e\omega_L}{2\pi} = \frac{e^2 B_0}{m 4\pi},$$

где  $T_L = \frac{2\pi}{\omega_L}$  – период вращения орбиты при прецессионном движении.

Этот ток создает магнитный момент, направленный против внешнего поля, а его величина может быть определена как:

$$\Delta p_0 = \Delta I_{orb} S_{\perp} = \frac{e^2 B_0}{m 4\pi} S_{\perp}. \quad (6)$$

где  $S_{\perp}$  – площадь проекции прецессирующей орбиты электрона на плоскость, перпендикулярную вектору магнитной индукции  $\vec{B}_0$ .

Дополнительный магнитный момент (6), происходящий из-за прецессии орбиты, связан с движением единственного электрона. Поскольку в атоме может быть  $Z$  электронов, то общий наведенный орбитальный момент атома равен:

$$\Delta \vec{P}_0 = -\frac{e^2 \vec{B}_0}{m 4\pi} Z \langle S_{\perp} \rangle,$$

где  $\langle S_{\perp} \rangle$  – усредненная по движению всех электронов атома площадь проекции прецессирующих орбит на плоскость, перпендикулярную вектору магнитной индукции  $\vec{B}_0$ . Возникновение индуцированного внешним полем магнитного момента электрона, всегда направленного против него, в итоге приводит к ослаблению внешнего магнитного поля  $\vec{B}_0$ . Этот универсальный механизм называется диамагнетизмом.

В этой работе на основе позиций классической физики была рассмотрена простейшая модель атома, которая может быть использована как основа для объяснения магнитных характеристик вещества. Эта же модель может быть использована и как детектор для регистрации внешнего неизвестного магнитного поля. Она служит базовым элементом приборов пожарной экспертизы, использующихся в известных методиках определения локализации источника очага пожара, основанных на измерении магнитных характеристик вещества.

### Литература

1. Трубилко А.И. Некоторые вопросы безопасности в простых задачах механики // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2016. № 2 (18). С. 47–59.
2. Трубилко А.И. Безопасность движения с точки зрения задач механики // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2017. № 3 (23). С. 34–46.
3. Трубилко А.И., Трубилко Л.А. Пожарная безопасность в некоторых задачах электростатики // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2018. № 2 (26). С. 30–41.
4. Трубилко А.И., Трубилко Л.А. Простая модель короткого замыкания // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2019. № 3 (31). С. 10–19.
5. Чешко И.Д. Технические основы расследования пожаров. М., ВНИИПО, 2002. 329 с.



---

---

# ИНЖЕНЕРНОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

---

---

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ТОЛЩИНЕ ПОТОЛОЧНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ В УСЛОВИЯХ ВНУТРЕННЕГО ПОЖАРА

**А.А. Кузьмин, кандидат педагогических наук, доцент;**

**Н.Н. Романов, кандидат технических наук, доцент.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России;**

**А.З. Жандаров.**

**Главное управление МЧС России по Республике Ингушетия**

Показано, что для исследования прогрева строительных конструкций при пожарах необходимо производить решение задачи нестационарной теплопроводности в твёрдых телах с учетом переменных граничных условий и изменяющихся теплофизических свойств как огнезащитных материалов, так и металлических конструкций. Представлена реализация приближенного метода расчета распределения температуры по толщине ограждающей конструкции в условиях внутреннего пожара, которая приводит к удовлетворительным для инженерной практики результатам.

*Ключевые слова:* предел огнестойкости, граничные условия, нестационарная теплопроводность, теплофизические свойства, коэффициент теплообмена

## METHOD FOR CALCULATING THE TEMPERATURE DISTRIBUTION BY THE THICKNESS OF THE CEILING UNDER THE CONDITIONS OF THE INTERNAL FIRE

A.A. Kuzmin; N.N. Romanov.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia;

A.Z. Zhandarov.

Main Directorate of EMERCOM of Russia for the Republic of Ingushetia

It is shown that to study the heating of building structures during fires, it is necessary to solve the problem of unsteady heat conduction in solids, taking into account variable boundary conditions and changing thermophysical properties of both flame retardant materials and metal structures. The implementation of an approximate method for calculating the temperature distribution over the thickness of the building envelope in an internal fire is presented, which leads to satisfactory results for engineering practice.

*Keywords:* fire resistance limit, boundary conditions, non-stationary thermal conductivity, thermophysical properties, heat transfer coefficient

Одна из главных задач при возведении сооружений различного назначения – обеспечение прочности и устойчивости несущих конструкций не только при нормальных условиях эксплуатации, но и в условиях возможного пожара, то есть при воздействии высоких температур. Пожарная безопасность или огнестойкость зданий достигается прежде всего соответствующим подбором конструкций, обладающих определенным пределом огнестойкости.

Предел огнестойкости строительной конструкции по теплоизолирующей способности определяется временем в часах от начала воздействия высоких температур до выполнения одного из следующих условий [1]:

- повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции в среднем более чем на  $140^{\circ}\text{C}$ ;
- повышения температуры в любой точке необогреваемой поверхности более чем на  $180^{\circ}\text{C}$  по сравнению с начальной температурой;
- повышения температуры более чем на  $220^{\circ}\text{C}$  независимо от начальной температуры конструкции.

В течение этого времени конструкция должна обладать заданными эксплуатационными качествами в условиях пожара. Таким образом, чтобы определить предел огнестойкости конструкции, необходимо знать время ее прогрева до заданной критической температуры.

Основные положения методов теоретического расчета конструкций на огнестойкость состоят из решения статической и теплофизической задач. При этом, вследствие сложного характера изменения температуры реальных пожаров, наиболее сложным является решение теплофизической задачи. Для исследования прогрева строительных конструкций при пожарах необходимо производить решение задачи нестационарной теплопроводности в твердых телах с учетом краевых условий и изменяющихся теплофизических свойств как огнезащитных материалов, так и металлических конструкций.

Изменение температурного поля внутри твердого тела описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье. У строительных конструкций, как правило, один из геометрических размеров гораздо больше двух остальных. Так, у железобетонной плиты перекрытия ее толщина значительно меньше ширины и длины. Таким образом, это дает возможность провести решение уравнения Фурье для одномерного температурного поля.

При отсутствии внутренних источников теплоты, дифференциальное уравнение теплопроводности может быть представлено следующим образом:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a(t) \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$t_i|_{\tau=0} = t_{f2}$$

и граничными условиями третьего рода:

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\alpha_1}{\lambda} (t_{f1}(\tau) - t_0),$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = -\frac{\alpha_2}{\lambda} (t_{\delta} - t_{f2}).$$

Подобная задача решается аналитически или численными методами.

Аналитическое решение возможно только для тел простой формы либо при граничных условиях, неизменных во времени. Однако аналитическое решение вызывает значительные трудности вследствие громоздкости математических вычислений.

Наиболее просто задачи теплопроводности с изменяющимися граничными условиями решаются методом конечных разностей. Суть данного метода заключается в замене дифференциального уравнения конечно-разностным – дифференциалы заменяются конечными приращениями. Заменяем дифференциалы в уравнении (1) конечными приращениями. Для этого всю толщину стенки  $\delta$  разделим на  $n$  слоев одинаковой толщины  $\Delta x$  :

$$\Delta x = \frac{\delta}{n}$$

и обозначим их индексами « $i$ » (то есть индекс « $i$ » будет меняться от 0 до  $n$ ,  $i = 0, \dots, n$ ).

По аналогии с разностной сеткой для пространственных координат выбирается расчетный интервал по времени  $\Delta \tau$ . Индекс « $j$ » ( $j = 0, 1, 2, \dots, k$ ) характеризует температуру в расчетный момент времени  $t(\tau_j)$ .

В таком случае, например,  $t(x_i, \tau_j)$  обозначает температуру в середине  $i$ -го слоя в момент времени  $j$  (то есть температуру в точке с координатами  $x_i = i \cdot \Delta x$  и  $\tau_j = j \cdot \Delta \tau$ ).

Приближенное значение величины  $t(i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta \tau)$  для удобства записываются в индексной форме, то есть:

$$t_{i,j} = t(x_i, \tau_j) = t(i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta \tau).$$

Таким образом, область непрерывного изменения температуры заменяется областью дискретного изменения.

Наиболее просто решаются конечно-разностные уравнения, соответствующие явной схеме. Смысл явной схемы заключается в том, что при нахождении температур в любой момент времени используются уже известные значения температур с предыдущего момента времени, то есть осуществляется последовательное решение уравнений с одним неизвестным (искомой температурой).

Аппроксимация функций – операция неоднозначная. Исходя из конкретных физических условий протекания процесса, первую производную температуры по координате абсцисс  $x$  в момент времени  $j \cdot \Delta \tau$  и изменение температуры во времени для любого  $i$ -го слоя можно представить следующими разностными выражениями [2]:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t_{j,i} - t_{j,i-1}}{\Delta x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t_{j,i+1} - t_{j,i-1}}{2\Delta x}. \quad (3)$$

Соотношения (2) и (3) называют соответственно правой, левой и центральной разностями. Все они при  $\Delta x \rightarrow 0$  стремятся к  $\frac{\partial t}{\partial x}$ . Производная от температуры по времени для слоя  $i$  имеет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \approx \frac{t_{i,j} - t_{i,j-1}}{\Delta \tau}. \quad (4)$$

Вторую производную температуры  $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$  можно заменить и записать в виде:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \approx \frac{t_{j,i+1,j-1} - 2t_{i,j-1} + t_{i-1,j}}{\Delta x^2}. \quad (5)$$

Подставляя полученные значения (4) и (5) в уравнение (1), имеем:

$$\frac{t_{j,i} - t_{j-1,i}}{\Delta \tau} = a(\bar{t}) \cdot \frac{t_{j-1,i+1} - 2t_{j-1,i} + t_{j,i-1}}{\Delta x^2}. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) относительно  $t_{j,i}$  имеет вид:

$$t_{j,i} = \left(1 - 2 \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2}\right) \cdot t_{j-1,i} + a(\bar{t}) \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} \cdot (t_{j-1,i+1} + t_{j,i-1}). \quad (7)$$

Если обозначить:

$$Fo_i = a(\bar{t}) \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2}, \quad (8)$$

где  $a(\bar{t})$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -ого слоя при температуре, то:

$$\bar{t} = \frac{t_{i,j-1} + t_{i+1,j}}{2}.$$

Таким образом, решение (7) можно представить в виде:

$$t_{j,i} = (1 - 2 \cdot Fo_i) \cdot t_{j-1,i} + Fo_i \cdot (t_{j-1,i+1} + t_{j,i-1}). \quad (9)$$

Уравнение (9) устанавливает связь между искомой температурой в точке  $i$  и температурами в соседних узлах сетки ( $i-1$ ) в данный момент и ( $i+1$ ) из предыдущего интервала времени.

Для нахождения температур на наружной и внутренней поверхностях стенки в  $j$ -ый момент времени, необходимо использовать граничные условия.

При граничных условиях третьего рода:

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\alpha_1}{\lambda} (t_{f1} - t), \quad (10)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = -\frac{\alpha_2}{\lambda} (t - t_{f2}), \quad (11)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи между окружающими средами и внутренней и наружной поверхностями стены соответственно;  $t_{f1}, t_{f2}$  – температуры сред со стороны внутренней и наружной поверхностей стены соответственно.

Температуры внутренней  $t_{j,0}$  (при  $i=0$ ) и наружной поверхностей стены  $t_{j,\delta}$  (при  $i=n$ ) определяются из соответствующих уравнений тепловых балансов для граничных слоев стенки:

$$c(\bar{t}) \cdot \rho \cdot s \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_1 \cdot (t_{f1} - t) + \lambda \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (12)$$

$$c(\bar{t}) \cdot \rho \cdot s \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} - \alpha_2 \cdot (t - t_{f2}), \quad (13)$$

где  $c(\bar{t})$  и  $\rho$  – удельная теплоемкость и плотность материала стенки;  $s$  – толщина граничных слоев, которая принимается равной:

$$s = \Delta x / 2.$$

На основе уравнений (11) и (12) составляются балансовые конечно-разностные уравнения:

$$\frac{t_{j,0} - t_{j-1,0}}{\Delta \tau} = \frac{2\alpha_1}{c(\bar{t}) \cdot \rho \cdot \Delta x} (t_{f1} - t_{j-1,0}) + \frac{2a}{\Delta x^2} (t_{j-1,2} - t_{j-1,0}), \quad (14)$$

$$\frac{t_{j,n} - t_{j-1,n}}{\Delta \tau} = \frac{2\alpha_2}{c(\bar{t}) \cdot \rho \cdot \Delta x} (t_{f2} - t_{j-1,n}) + \frac{2a}{\Delta x^2} (t_{j-1,n-1} - t_{j-1,n}). \quad (15)$$

Как видно, решение уравнений (14) и (15) дает возможность определить искомые температуры на границах стенки:

– для внутренней поверхности стенки:

$$t_{j,0} = (1 - 2 \cdot Fo_1 - \sigma_1) t_{j-1,0} + 2 \cdot Fo_1 \cdot t_{j-1,1} + \sigma_1 \cdot t_{f1}; \quad (16)$$

– для внешней поверхности стенки:

$$t_{j,n} = (1 - 2 \cdot Fo_2 - \sigma_2) t_{j-1,n} + 2 \cdot Fo_2 \cdot t_{j-1,n-1} + \sigma_2 \cdot t_{f2}. \quad (17)$$

В уравнениях (16) и (17):

$$\sigma_1 = \frac{2\alpha_1 \cdot \Delta \tau}{c(\bar{t}) \cdot \rho \cdot \Delta x}, \quad (18)$$

$$\sigma_2 = \frac{2\alpha_2 \cdot \Delta \tau}{c(\bar{t}) \cdot \rho \cdot \Delta x}. \quad (19)$$

Совокупность разностных уравнений (9), (16) и (17), аппроксимирующих основное дифференциальное уравнение (1) и граничные условия (10–11), является разностной схемой. Использование разностных схем позволяет свести решение задачи для дифференциального уравнения к решению системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{j,0} = A_1 \cdot t_{j-1,0} + 2 \cdot Fo_i \cdot t_{j-1,1} + \sigma_1 \cdot t_{f1} \\ t_{j,1} = B \cdot t_{j-1,1} + Fo_i \cdot (t_{j-1,2} + t_{j,0}) \\ t_{j,2} = B \cdot t_{j-1,2} + Fo_i \cdot (t_{j-1,3} + t_{j,1}) \\ \dots \\ t_{j,n-1} = B \cdot t_{j-1,n-1} + Fo_i \cdot (t_{j-1,n+1} + t_{j,n-1}) \\ t_{j,n} = A_2 \cdot t_{j-1,n} + 2 \cdot Fo_i \cdot t_{j-1,n-1} + \sigma_2 \cdot t_{f2} \end{array} \right. , \quad (20)$$

где  $A_1 = 1 - 2 \cdot Fo_i - \sigma_1$ ;  $A_2 = 1 - 2 \cdot Fo_i - \sigma_2$ ;  $B = 1 - 2 \cdot Fo_i$ .

Данная схема является явной, так как температуры  $t_{j,i}$  определяются по известным значениям  $t_{j-1,i}$  из предыдущего расчетного момента времени.

Однако для численного метода решения системы уравнений вопросы точности играют первостепенную роль. Сравнительный анализ точных решений дифференциальных уравнений с численными решениями конечно-разностных аналогов позволил сделать вывод о необходимости выполнения некоторого условия разбиения на пространственные и временные слои (условие устойчивости), нарушение которого приводит к возникновению неустойчивости схемы, то есть к быстрому накоплению погрешности.

Однако условие устойчивости для явных схем может привести к ситуации, когда с целью повышения точности пространственный слой ( $\Delta x$ ) выбирается достаточно малым, что, в свою очередь, приведет к такому уменьшению временного интервала  $\Delta \tau$ , что для завершения процесса решения задачи потребуется огромное количество шагов по времени [3].

Значения  $\Delta \tau$  и  $\Delta x$  для решения дифференциального уравнения теплопроводности (1) с граничными условиями третьего рода должны определяться из соответствующего условия устойчивости:

$$\frac{\Delta \tau}{\frac{a}{\Delta x^2} + \frac{\alpha_{\max}}{c\rho\Delta x}} \leq 0.5, \quad (21)$$

где  $\alpha_{\max}$  – максимальный коэффициент теплоотдачи из заданных  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_0$  со стороны внешней среды (необогреваемой поверхности) перекрытия определяется как:

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_{\text{л}}, \quad (22)$$

где  $\alpha_k$  и  $\alpha_{\text{л}}$  – конвективная и лучистая составляющие коэффициента теплоотдачи соответственно.

Конвективный коэффициент теплоотдачи может быть определен по формуле:

$$\alpha_k = \frac{Nu}{d} \lambda_f, \quad (23)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта, характеризующее соотношение между интенсивностью конвективного и кондуктивного теплообмена (в условиях неподвижной среды);  $d$  – определяющий размер тела, для горизонтальной плиты перекрытия – толщина, м;  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м · °С).

Для горизонтальных ограждений (потолочные перекрытия) – число Нуссельта определяется из соотношения [4]:

$$Nu = 0,135 \cdot (Gr \cdot Pr)_{f0}^{0,33} \cdot \left( \frac{Pr_{f0}}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (24)$$

где  $Gr$  и  $Pr$  – критерии Грасгофа и Прандтля соответственно.

Данные критерии определяются по формулам:

$$Gr = \beta g \frac{d^3 \Delta t}{\nu^2}, \quad (25)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (26)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения,  $1/K$ ;  $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ );  $\Delta t$  – разность температур между плитой и воздухом окружающей среды,  $^{\circ}C$ ;  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Температурный коэффициент объемного расширения  $\beta$  определяется по формуле:

$$\beta = \frac{1}{t_{fo} + 273}. \quad (27)$$

Лучистый коэффициент теплоотдачи согласно [4]:

$$\alpha_{л} = \frac{C_0 \varepsilon_{пр} [(T_w(\delta; \tau))^4 - (T_{fo})^4]}{t_w(\delta; \tau) - t_{fo}}, \quad (28)$$

где  $C_0$  – постоянная Стефана-Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $\varepsilon_{пр}$  – приведенная степень черноты системы «необогреваемая поверхность – воздух» (принимается равной 0,8).

Из приведенной методики видно, что точность расчета напрямую зависит от выбранной толщины слоя  $\Delta x$  и временного интервала  $\Delta t$ . Однако увеличение числа слоев и уменьшение временного интервала существенно повышают количество и трудоемкость расчетов. Для получения достаточно точной картины температурного поля в сечении плиты-перекрытия расчеты нецелесообразно производить вручную. Для этого, как правило, используются специальные программные комплексы.

Одним из таких комплексов является программный модуль, разработанный на кафедре физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, который позволяет решать задачи нестационарной теплопередачи.

Правомерность использования разработанной методики для расчетов температурных полей конструкций объектов нефтегазового комплекса в условиях внутреннего пожара была доказана путем сопоставления результатов огневых испытаний при стандартном тепловом воздействии с результатами численных экспериментов, реализующих данную методику.

При воздействии стандартного температурного режима по ГОСТ Р 12.3.047–98 [1] температура продуктов горения изменяется согласно зависимости:

$$t_f = 345Lg(8\tau + 1) + t_0.$$

Для условий стандартного пожара с помощью выбранного программного продукта были проведены численные расчеты температуры прогрева тяжелого бетона в плитах и стенах на различных заполнителях, а также в плитах и стенах из конструкционного керамзитобетона различной толщины. Результаты численных экспериментов, реализующих разработанную методику, а также сопоставление с результатами огневых испытаний по ИСО 834, представлены на рис. 1–3 и в таблице.

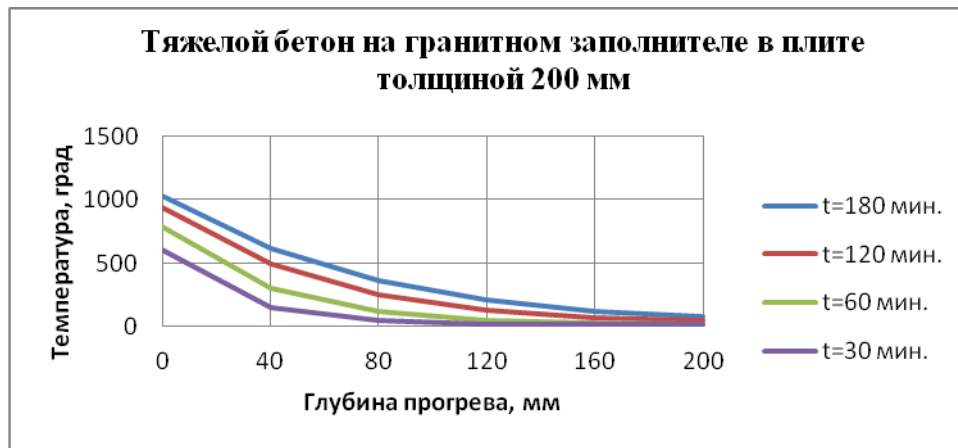


Рис. 1. Изменение температуры прогрева в тяжелом бетоне на гранитном заполнителе в плите толщиной 200 мм при одностороннем огневом воздействии

Таблица. Сопоставление результатов численных экспериментов с результатами огневых испытаний

Глубина прогрева, мм	$\tau=30$ мин		$\tau=60$ мин		$\tau=90$ мин		$\tau=120$ мин		$\tau=150$ мин		$\tau=180$ мин	
	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.
0	607	630	785	800	879	890	943	930	991	980	1029	1000
40	156	160	303	290	410	390	493	470	560	510	615	560
80	48	56	119	110	190	155	255	220	313	280	364	310
120	25	32	50	51	88	80	130	105	172	140	212	160
160	21	26	28	35	46	48	71	60	98	78	126	90
200	20	22	23	26	33	32	47	40	65	50	83	65

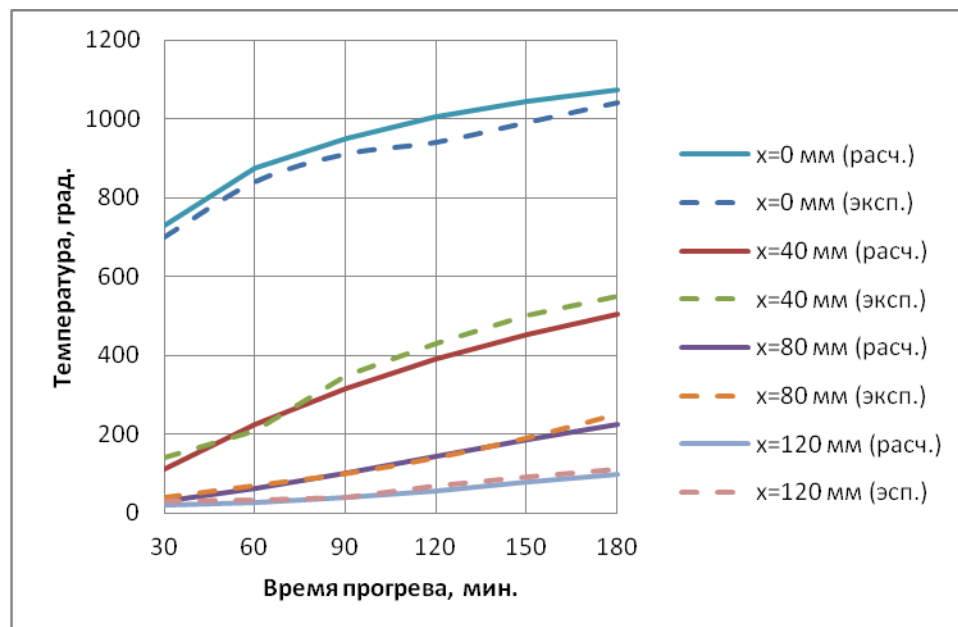
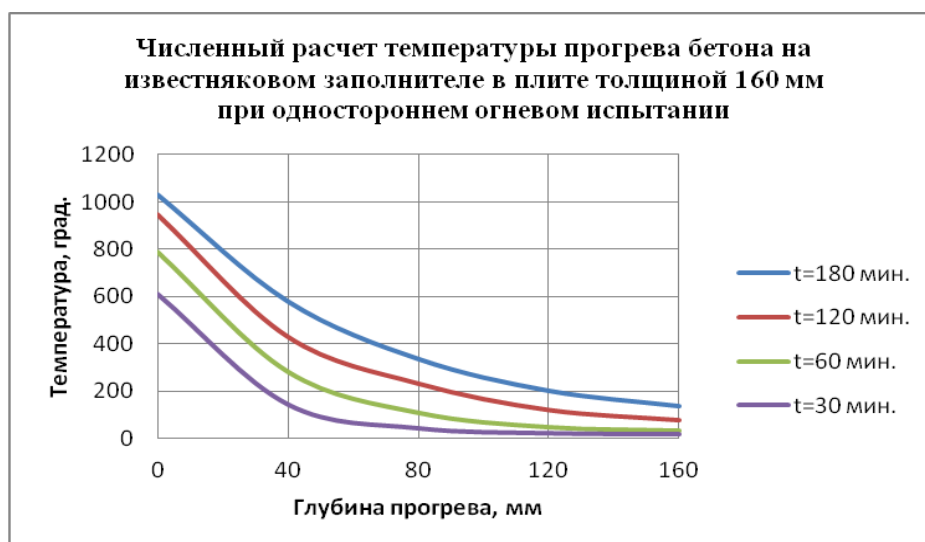


Рис. 2. График сопоставления результатов численных экспериментов с результатами огневых испытаний керамзитобетона толщиной 160 мм





**Рис. 3. Изменение температуры прогрева в тяжелом бетоне на известковом заполнителе в плите толщиной 160 мм при одностороннем огневом воздействии**

Анализируя представленные в таблице результаты, следует отметить, что наибольшие расхождения расчетных значений температуры от результатов огневых испытаний наблюдаются только около необогреваемой поверхности плиты – менее 20 %. Сравнение результатов показало, что в основном расхождение значений не превышает 10–15 % на всем процессе нагрева.

Таким образом, сопоставление результатов вычислительного эксперимента и огневых испытаний подтверждает адекватность предложенной методики расчетов температурных полей и оценки огнестойкости несущих конструкций.

### **Литература**

1. ГОСТ Р 12.3.047–98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 30.02.2020).
2. Зайцев А.М., Бологов В.А. Численное моделирование прогрева строительных конструкций для определения коэффициента теплоотдачи при пожарах // Вестник воронежского ин-та ГПС МЧС России. 2015. № 1.
3. Пашковский П.С., Зинченко И.Н., Богомаз А.М. Математическая модель тепломассообменных процессов при пожаре в здании // Научный вестник НИИГД «Респиратор». 2015. Вып. 52. С. 51–59.
4. Методы расчета температурного режима в помещениях зданий различного назначения / И.С. Молчадский [и др.]. М.: ВНИИПО, 1983. 49 с.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ШТОР**

**Д.А. Минкин, кандидат технических наук, доцент;**

**К.В. Загайнов.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Рассмотрены методы повышения огнестойкости огнезащитных штор, проведен обзор материалов, используемых в конструкции, особенностей их применения. Представлена методика расчета тепловых характеристик шторы и проведен расчет для трех вариантов

конструкции. По результатам работы выработаны рекомендации по обеспечению требуемой огнестойкости огнезащитной шторы с помощью пассивных методов.

*Ключевые слова:* противопожарные шторы, пожарная безопасность, огнестойкость, тепловое сопротивление

## MATERIALS AND METHODS FOR IMPROVING OF FIRE-PROTECTIVE CURAINS FIRE RESSISTANCE

D.A. Minkin; K.V. Zagaynov.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

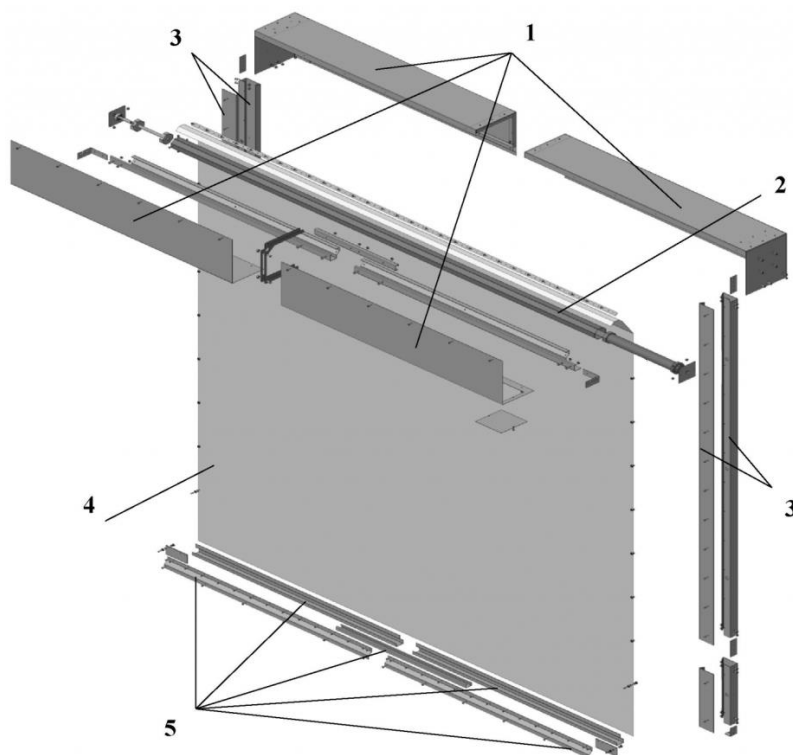
Article describes methods for improving of fire resistance of fire-protective curtains, properties of materials, which are used in construction of curtain, and specificity of usage. Methodology for calculation of thermal properties of fire-protective curtains is presented and realized for three types curtain constructions. In results of paper recommendations for providing of required fire-curtain fire-resistance with help of passive methods are formulated.

*Keywords:* fire-protective curtain, fire safety, fire-resistance, heat resistance

Современные огнезащитные противопожарные шторы являются активно развивающимся видом трансформируемых противопожарных преград. Их применение позволяет ограничивать распространение пожара и его опасных факторов путем разделения внутреннего пространства зданий и сооружений в соответствии с Федеральным законом от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и СП 2.13130.2012 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты». Основным достоинством таких конструкций является возможность их скрытного и компактного размещения в свернутом или сложенном виде на границах отсекаемого пространства. При этом для их установки не требуется пересмотр архитектурных и интерьерных решений пространства ввиду относительно небольшой массы, малой площади и различных возможностей монтажа (в коробе над проходами, воротами, в верхних частях дверей, использование сегментных конструкций, размещение на фасаде и т.д.).

При пожаре в случае возникновения угрозы распространения огня шторы раскрываются, позволяя локализовать очаг возгорания, тем самым останавливая распространение пламени, дыма, раскаленных газов и других опасных факторов пожара. Это дает возможность успешно эвакуировать людей, оградить защищаемое технологическое оборудование и снизить вероятный материальный ущерб. В качестве примера на рис. 1 приведена конструкция противопожарной шторы в раскрытом виде. До наступления пожара полотно 4 шторы находится в свернутом на валу 2 состоянии в коробе 1.

Конструктивные параметры противопожарных штор, а также методы их испытаний определяются требованиями ГОСТ 30247.0–94, ГОСТ Р 53307–2009 и ГОСТ Р 53305–2009. В зависимости от назначения зданий и условий их эксплуатации требуется установка противопожарных преград с огнестойкостью в диапазоне от EI 60 до EI 180. Для обеспечения пределов огнестойкости до EI 120 при изготовлении штор используются огнестойкие текстильные материалы, тонкая эластичная сталь, теплозащитные сетчатые экраны, теплоизоляционные и вспучивающиеся материалы [1–6]. Такие решения позволяют автономно использовать огнезащитные шторы без применения системы подачи воды и электричества, что приводит к низкой стоимости и высокой надежности конструкции.



**Рис. 1. Конструкция огнезащитной шторы:**  
**1 – защитный короб; 2 – вал; 3 – боковые направляющие; 4 – полотно шторы;**  
**5 – подвижная планка**

Тем не менее, анализ современных источников [1–6] показал, что среди возможных путей обеспечения огнестойкости противопожарных преград более EI 120 доминирующим является применение воды для орошения нагретых поверхностей преграды, для распыления в межсеточном пространстве теплозащитных экранов, а также применение влагосодержащих слоев пористо-волокнистых материалов. Основными недостатками предложенных технических решений является значительное усложнение и удорожание конструкции преграды, увеличение её массогабаритных параметров, необходимость организации подачи воды, ограниченная огнестойкость влагосодержащих слоев, материальный ущерб, наносимый распыляемой водой и конденсацией испарившейся влаги.

Данная статья посвящена вопросам повышения огнестойкости противопожарных штор за счет использования методов и материалов, позволяющих обеспечить их автономную работу в течение длительного времени. Целью работы является выработка рекомендаций по обеспечению требуемой огнестойкости огнезащитной шторы, находящейся в условиях интенсивного теплового воздействия в стационарном режиме. Для достижения поставленной цели необходимо провести расчет теплового сопротивления для нескольких вариантов конструктивного исполнения шторы [7].

### **Материалы, используемые в конструкции противопожарной шторы**

Основным элементом конструкции огнезащитной шторы является полотно, изготавливаемое из термостойкого материала. Для изготовления используется текстиль на основе минеральных волокон, таких как кремнезем, базальт, стекловолокно, тонкие металлические цельные листы и сетки [1, 2]. Свойства материалов, применяемых для изготовления полотна, приведены в таблице.

Таблица. Свойства полотен для огнезащитной шторы

	Полотно	Теплопроводность, Вт/мК	Применение, °С
1	Стекловолокно	0,03–0,04	550
2	Базальт	3,5	1450
3	Кремнезем	0,8	1200
4	Кварц	34	1300
5	Кевлар	0,04	450
6	Нержавеющая сталь (сетка)	50	500–850

Ключевым требованием, предъявляемым к полотну, является способность сохранять механическую прочность в условиях высокотемпературного воздействия и не выделять при этом токсичных и горючих веществ.

Для обеспечения изолирующей способности огнезащитной шторы могут применяться термостойкие низкотеплопроводные микропористые материалы, а также минераловата, стекловата. В таком случае полотно представляет собой многослойную конструкцию. Это позволяет выдерживать температуры до 1 500 °С в течение длительного времени.

Еще одним способом обеспечения изолирующей способности шторы является применение вспучивающихся материалов, наносимых на полотно в процессе изготовления изделия. Толщина такого покрытия до возникновения пожара составляет единицы миллиметров. После наступления пожара шторы раскрываются, и в условиях высокотемпературного воздействия покрытие увеличивается в толщине в десятки раз (вспучивается), образуя пористую структуру, что позволяет обеспечить необходимое тепловое сопротивление.

При температуре среды, соответствующей пожару, теплопроводность пористых и волокнистых материалов повышается ввиду переноса теплоты в толще материала за счет теплового излучения. Для уменьшения вклада лучистой составляющей теплообмена полотно может быть покрыто металлической фольгой или армировано сеткой.

Для оценки эффективности применяемых технических решений в части повышения огнестойкости, ключевым параметром является температура на необогреваемой поверхности противопожарной преграды.

### Методика расчета и оценка тепловых характеристик

Расчет теплоизолирующей способности огнезащитной шторы в зависимости от количества слоев в полотне шторы, их размеров, теплофизических свойств применяемых материалов и уровня температур проводится на основе тепловой и математической модели процесса теплопередачи через полотно шторы. В результате проведенных вычислений можно обосновать параметры конструкции шторы для обеспечения требуемого уровня огнестойкости. В данной статье будет рассмотрено три варианта конструкции шторы:

- полотно шторы содержит два слоя текстильного материала, между которыми находится воздушная прослойка;
- полотно шторы содержит два слоя текстильного материала, между которыми находится слой стекловаты;
- многослойное текстильное полотно, на внутренних слоях которого расположены металлические экраны из алюминиевой фольги.

При возникновении пожара поверхность шторы подвергается высокотемпературному воздействию, при этом теплота от факела пламени передается за счет теплового излучения

и конвекции, в результате температура обогреваемой поверхности увеличивается. С обогреваемой поверхности за счет теплопроводности и теплового излучения теплота проходит через полотно шторы на противоположную необогреваемую и отводится в окружающую среду. Процесс теплопередачи представлен на тепловой модели (рис. 2).

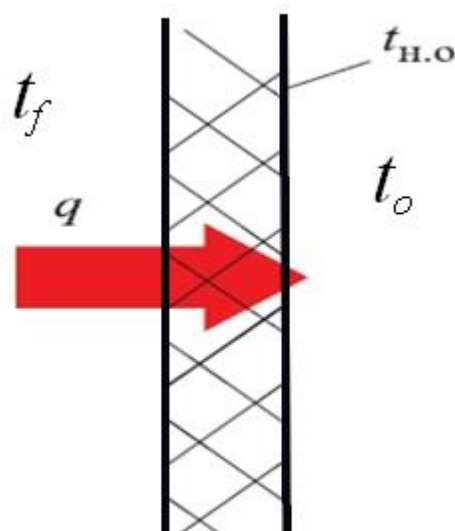


Рис. 2. Теплопередача через огнезащитную штору

Исходные данные для расчета определены требованиями Е1. При этом температура среды со стороны факела пламени считается равной 1 193 °С. Температура на необогреваемой поверхности не должна увеличиваться более чем на 180 °С по отношению к начальной и в то же время оставаться ниже 300 °С. Таким образом, считая что температура среды в помещении составляет 20 °С, температура на необогреваемой поверхности не должна превышать 200 °С.

Вычисление температуры на необогреваемой поверхности предлагается провести для условий стационарного режима. В таком случае, будем считать, что тепловой поток, идущий перпендикулярно через все слои шторы, остается величиной постоянной. Уравнение теплопередачи будет иметь вид [8]:

$$q = (t_f - t_o) \left( \frac{1}{\alpha_{п}} + R_{уд} + \frac{1}{\alpha_{н.о}} \right)^{-1},$$

где  $q$  – плотность теплового потока, проходящего через полотно шторы, Вт/м<sup>2</sup>;  $t_f$  – температура греющей среды, °С,  $t_o$  – температура окружающей среды с необогреваемой стороны, °С;  $R_{уд}$  – удельное тепловое сопротивление шторы, Км<sup>2</sup>/Вт;  $\alpha_{п}$ ,  $\alpha_{н.о}$  – коэффициенты, характеризующие интенсивность теплообмена на обогреваемой и необогреваемой поверхностях полотна, Вт/(м<sup>2</sup>К).

Значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{п}$  на обогреваемой поверхности определяется суммарной интенсивностью теплопереноса за счет конвекции и излучения от греющей среды пожара и зависит от целого ряда параметров, в том числе от степени черноты поверхности, расположения источника теплоты, температурного поля, скорости движения, вязкости, концентрации и состава продуктов горения. Вычисление  $\alpha_{п}$  проводится по расчетным соотношениям, полученным с помощью теории подобия на основе обработки большого числа экспериментов. В данной статье будет использоваться методика расчета, изложенная в источнике [9], показывающая удовлетворительную точность результатов вычислений для случая пожара в помещении, когда факел расположен непосредственно вблизи обогреваемой поверхности:

$$\alpha_{\text{п}} = 0,135(Gr \cdot Pr)^{1/3} \frac{\lambda}{L} + \frac{\varepsilon_{\text{о.п}} c_0 \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{о.п}}}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{п}} - T_{\text{о.п}}},$$

где  $Gr$  – критерий Грасгофа;  $Gr = \frac{g\beta L^3(T_{\text{п}} - T_{\text{о.п}})}{\nu^2}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения;  $\beta = 1/[0,5(T_f + T_{\text{о.п}})]$ ,  $\text{K}^{-1}$ ;  $T_f$  – температура продуктов горения,  $\text{K}$ ;  $T_{\text{о.п}}$  – температура на обогреваемой поверхности,  $\text{K}$ ;  $L$  – определяющий размер,  $\text{м}$ ;  $\nu$  – кинематическая вязкость среды,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $Pr$  – критерий Прандтля;  $\lambda$  – теплопроводность среды,  $\text{Вт}/(\text{мК})$ ;  $\varepsilon_{\text{о.п}}$  – степень черноты обогреваемой поверхности;  $c_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела  $c_0 = 5,67$ .

Вычисление коэффициента теплоотдачи на необогреваемой поверхности  $\alpha_{\text{н.о}}$  проведем по соотношению для свободно-конвективного и лучистого теплообмена [10]:

$$\alpha_{\text{н.о}} = \frac{Nu\lambda}{l} + \frac{\varepsilon_{\text{н.о}} c_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{н.о}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{н.о}} - T_0},$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $l$  – определяющий размер,  $\text{м}$ ;  $\varepsilon_{\text{н.о}}$  – степень черноты необогреваемой поверхности;  $T_{\text{н.о}}$ ,  $T_0$  – температуры необогреваемой поверхности и окружающей среды,  $\text{K}$ .

Значение суммарного теплового сопротивления  $R_{\text{уд}}$  шторы зависит от сопротивления каждого из слоев её конструкции. Для одного слоя текстильного полотна шторы  $R_{\text{уд}}$  может быть найдено по формуле:

$$R_{\text{уд1}} = \delta_{\text{тк}} / \lambda_{\text{тк}},$$

где  $\delta_{\text{тк}}$  – толщина слоя ткани,  $\text{м}$ ;  $\lambda_{\text{тк}}$  – коэффициент теплопроводности материала ткани.

В данной статье предлагается использовать для полотна шторы огнестойкий материал – кремнезём, отвечающий требованиям высокой механической прочности, обладающий высокой температурой плавления  $1\ 500\ ^\circ\text{C}$  и низкой теплопроводностью. Толщина изготавливаемого полотна составляет  $\delta_{\text{тк}} = 3\ \text{мм}$ . В таком случае удельное сопротивление одного слоя  $R_{\text{уд1}} = 3,75 \cdot 10^{-3}\ \text{K}/\text{м}^2\text{Вт}$ .

В рассматриваемом в данной статье варианте двуслойного исполнения шторы с воздушной прослойкой между слоями суммарное тепловое сопротивление может быть найдено из соотношения:

$$R_{\text{уд}} = \left( \alpha_{\text{луч}} + \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta} \varepsilon_{\text{к}} \right)^{-1} + \frac{2\delta_{\text{тк}}}{\lambda_{\text{тк}}},$$

где  $\alpha_{\text{луч}}$  – коэффициент теплообмена за счет теплового излучения,  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{K}$ ;  $\lambda_{\text{в}}$  – теплопроводность воздуха,  $\text{Вт}/\text{мК}$ ;  $\delta$  – толщина воздушной прослойки,  $\text{м}$ ;  $\varepsilon_{\text{к}} = 1$  – коэффициент конвективного теплообмена в прослойке. Величина  $\alpha_{\text{луч}}$  может быть рассчитана по зависимости [10]:

$$\alpha_{\text{луч}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot 5,67 \varphi_{12} \left( \frac{\left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4}{T_1 - T_2} \right),$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты текстильного слоя материала, которая вычисляется на основе значений степени черноты 1-го  $\varepsilon_1$  и 2-го  $\varepsilon_2$  слоев:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1},$$

где  $\varphi_{12}$  – коэффициент взаимной облученности;  $T_1, T_2$  – температуры внутренних поверхностей двух текстильных слоёв шторы, образующих прослойку, К.

Каждый из текстильных слоев шторы имеет степень черноты  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,9$ , при этом вычисление приведенной степени черноты дает значение  $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,81$ . Коэффициент взаимной облученности для двух параллельных пластин, находящихся на расстоянии 1 см друг от друга, равен  $\varphi_{12} = 0,97$ . В таком случае суммарное удельное тепловое сопротивление будет равно:

$$R_{\text{уд}} = \left( 400 + \frac{0,027}{1 \cdot 10^{-2}} \right)^{-1} + \frac{6 \cdot 10^{-8}}{0,8} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ Км}^2/\text{Вт}.$$

Зная температуры сред  $t_f$  и  $t_o$ , можно установить, что плотность теплового потока, проходящего через штору,  $q = 19 \text{ кВт/м}^2$ . Это позволяет вычислить температуру на необогреваемой поверхности:

$$t_{\text{н.о}} = t_f - q \left( \frac{1}{\alpha_{\text{н.о}}} + R_{\text{уд}} \right) = 950^\circ\text{C}.$$

Рассмотрим второй вариант конструкции огнестойкой шторы, когда полотно шторы содержит два слоя текстильного материала, между которыми находится слой стекловаты. В таком случае величина суммарного теплового сопротивления  $R_{\text{уд}}$  будет соответствовать задаче последовательного соединения тепловых сопротивлений и равняться алгебраической сумме тепловых сопротивлений каждого из слоев:

$$R_{\text{уд}} = \frac{2\delta_{\text{тк}}}{\lambda_{\text{тк}}} + \frac{\delta_{\text{ств}}}{\lambda_{\text{ств}}}.$$

При использовании стекловаты, имеющей теплопроводность  $\lambda = 0,04 \text{ Вт/мК}$  и толщину  $\delta = 1,5 \text{ см}$ , тепловое сопротивление шторы  $R_{\text{уд}} = 0,51 \text{ Км}^2/\text{Вт}$ . Плотность теплового потока, проходящего через штору,  $q = 1,9 \text{ кВт/м}^2$ .

Тогда температура на необогреваемой поверхности:

$$t_{\text{н.о}} = t_f - q \left( \frac{1}{\alpha_{\text{н.о}}} + R_{\text{уд}} \right) = 106^\circ\text{C}.$$

Третий вариант исполнения шторы предусматривает многослойное полотно, на внутренних слоях которого расположены металлические экраны из алюминиевой фольги. Такая конструкция призвана существенно снизить интенсивность лучистого теплообмена между слоями текстильного материала шторы. Степень черноты экрана имеет значение  $\varepsilon_3 = 0,1$ . Расчет приведенной степени черноты пары таких поверхностей дает значение  $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,05$ . Теплообмен в такой прослойке аналогичен первому рассмотренному примеру конструкции, однако наличие двух металлизированных поверхностей позволяет уменьшить  $\alpha_{\text{луч}}$  в 16 раз. Для обеспечения температуры  $200^\circ\text{C}$  на необогреваемой поверхности необходимо получить суммарное тепловое сопротивление  $R_{\text{уд}} = 0,27 \text{ К/м}^2\text{Вт}$ . В таком случае

приведенная степень черноты должна принимать значение  $\varepsilon_{\text{пр}} = 8,1 \cdot 10^{-3}$ . Для нахождения необходимого числа экранов воспользуемся соотношением [10]:

$$\varepsilon_{\text{прэ}} = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon} - 1},$$

где  $n$  – число экранов.

В результате вычислений получаем, что необходимо иметь шесть экранов.

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что применение воздушной прослойки для улучшения изоляционных свойств огнезащитной шторы не приводит к увеличению теплового сопротивления. Это связано с тем, что при передаче теплоты через полотно шторы в условиях повышенных температур вклад лучистой составляющей теплообмена в разы превосходит кондуктивный и конвективные механизмы. Аналогичная ситуация складывается и в случае применения пористых материалов. Температура на необогреваемой поверхности существенно превышает допустимые значения.

Применение в конструкции шторы изоляционных материалов, непрозрачных с точки зрения теплового излучения, показало существенное улучшение изоляционных характеристик. На основе проведенного расчета для шторы, содержащей слой стекловаты, можно сделать вывод, что такая конструкция позволяет выдерживать высокотемпературное воздействие в течение длительного времени. Однако следует отметить, что суммарная толщина слоев полотна в этом случае может достигать 1 см и более, что в свернутом виде приведёт к недопустимо большому объёму изделия.

Для снижения интенсивности лучистой составляющей теплообмена в конструкции шторы эффективным решением является установка тонких металлических экранов. Проведенные вычисления позволяют утверждать, что шесть экранов из алюминиевой фольги позволяют обеспечить необходимые значения температуры на необогреваемой поверхности. Недостатком такого технического решения является то, что тонкие экраны, находясь в свернутом состоянии до наступления пожара, будут слеживаться и контактировать друг с другом. Это может свести на нет экранирующий эффект, учитывая высокую теплопроводность металла.

Таким образом, пассивные способы повышения огнестойкости позволяют обеспечивать необходимые прочностные и изоляционные свойства противопожарных штор и могут быть рекомендованы для разработки огнезащитных штор. При этом предпочтение следует отдавать многослойной конструкции полотна, составленной из теплоизоляционных, экранирующих и огнезащитных материалов в необходимых сочетаниях.

### Литература

1. Шимко В.Ю. Противопожарные преграды на основе телозащитных сетчатых экранов для защиты объектов нефтегазового комплекса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: 2018.
2. Заикин С.В. Трансформируемые противопожарные преграды повышенной эффективности : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Сергиев Посад, 2012.
3. Ляпин А.В. Современные огне- и дымозащитные преграды // Пожаровзрывобезопасность. 2008. № 6. Т. 17. С. 49–56.
4. Корольченко А.Я., Гетало Д. Противопожарные шторы (обзор) // Пожаровзрывобезопасность. 2015. № 4. Т. 24. С. 56–65.
5. Dombrovsky L.A., Dembele S., Wen J. X. Shielding of fire radiation with the use of multi-layered water mist curtains: preliminary estimates // Computational Thermal Sciences: An International Journal. 2016. Vol. 8, No. 4. P. 371–380.



6. Огнезащитные вспучивающиеся покрытия на основе перхлорвинилового смолы для стеклопластика / М.С. Лобанова [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 8 (145). С. 207–210.
7. Тепловой режим огнезащитной шторы в условиях интенсивного теплового воздействия / В.А. Кораблев [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2017. № 4. Т. 26. С. 29–36.
8. Молчадский И.С. Пожар в помещении. М.: ВНИИПО, 2005. 456 с.
9. Зайцев А.М., Болгов В.А. Определение коэффициента теплоотдачи в строительные конструкции при стандартном пожаре // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 9. С. 49–53.
10. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Теплообмен: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 550 с.

## **ВЫБОР ТИПА ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТИХВИНСКОГО ВВЕДЕНСКОГО СОБОРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ**

**М.И. Ершова;**

**С.А. Самойленко;**

**А.Н. Иванов, кандидат технических наук, доцент.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Рассмотрена методика выбора типа пожарного извещателя на основе анализа целевой функции. Произведен расчет по данной методике на примере помещения молельного зала Тихвинского Введенского собора. Результаты расчета были сопоставлены с требованиями по расстановке пожарных извещателей, указанных в СП 5.13130.2009.

*Ключевые слова:* пожарный извещатель, молельный зал, целевая функция

## **SELECTION OF TYPE OF FIRE DETECTORS FOR TIKHVIN VINSKY CATHEDRAL BASED ON ANALYSIS OF TARGET FUNCTION**

M.I. Ershova; S.A. Samoylenko; A.N. Ivanov.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The method of selecting the type of fire detector based on the analysis of the target function is considered. The calculation was made using this method on the example of the prayer hall of the Tikhvin Vvedensky Cathedral. The results of the calculation were compared with the requirements for the placement of fire detectors specified in SP 5.13130.2009.

*Keywords:* fire detector, prayer hall, target function

В настоящее время наряду с совершенствованием законодательной базы в области пожарной безопасности объектов религиозного назначения, а именно с внесением изменений в Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и введением СП 258.1311500.2016 «Объекты религиозного назначения. Требования пожарной безопасности», все больше становятся актуальными вопросы, связанные с разработкой мероприятий по обеспечению пожарной безопасности указанных объектов.

Одним из видов противопожарных мероприятий является размещение пожарных извещателей в соответствии с имеющимися нормами [1]. Однако выбор извещателя из множества типов, предлагаемых производителями на рынке, должен производиться с учетом определенных параметров применительно к конкретному помещению.

Для наиболее точной расстановки пожарных извещателей необходимо учитывать не только площадь и тип помещения, но и технические характеристики конкретной модели пожарного извещателя.

В качестве примера было произведено обоснование выбора типа системы автоматической пожарной сигнализации для помещения молельного зала Тихвинского Введенского собора на основе анализа целевой функции [2].

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для расчета

№	Наименование	Параметры, ед. измерения	Помещение молельного зала	Примечание
1.	Площадь помещения	$S, \text{ м}^2$	150	
2.	Высота помещения	$H, \text{ м}$	3,3	
3.	Удельная частота возникновения загораний на объектах данного типа	$\omega, \text{ год}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$	0,0004	Приказ МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382 (п. 8)
4.	Стоимость материальных ценностей в помещении с учетом косвенных потерь при их утрате	$C_{\text{пом}}, \text{ руб.}$	2 000 000	
5.	Приведенная массовая скорость выгорания	$\Psi, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$	0,032	Арутюнян Д.М. Новые технологии гарантированного предотвращения пожаров: монография (прил. 1, с. 69)
6.	Линейная скорость распространения пламени	$v_{\text{л}}, \text{ м/с}$	0,03	Арутюнян Д.М. Новые технологии гарантированного предотвращения пожаров: монография (прил. 1, с. 69)
7.	Низшая теплота сгорания	$Q_{\text{н}}, \text{ кДж/кг}$	28 000	Арутюнян Д.М. Новые технологии гарантированного предотвращения пожаров: монография (прил. 1, с. 69)
8.	Температура в помещении до загорания	$T_{\text{о}}, \text{ К}$	291	СП 391.1325800.2017 Храмы православные. Правила проектирования (табл. 9.1) (18 °С) [4]
9.	Время от момента срабатывания извещателя до момента локализации очага горения	$\Delta t, \text{ с}$	1 200	Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (в ред. от 27 дек. 2018 г.)

Согласно СП 5.13130.2009 «Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования» (прил. М) в помещении данного типа рекомендуется устанавливать дымовые пожарные извещатели. С учетом высоты защищаемого помещения (3,3 м) следует применять точечные дымовые пожарные извещатели.

Для расчета были выбраны три типа точечных дымовых пожарных извещателей, параметры которых приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры точечных дымовых пожарных извещателей

№	Наименование	Параметры	ИП 212-52	ИП 212-81	ИП 212-63а
1.	Срок службы извещателя	T, лет	10	10	10
2.	Стоимость пожарного извещателя с учетом установки и эксплуатации	C <sub>0</sub> , руб.	1 300	2 500	4 500
3.	Чувствительность	α, непер	0,012	0,023	0,046
4.	Максимальное расстояние между извещателями	L, м	9	9	9

Расчёт целевой функции произведен в соответствии с методикой, приведенной в монографии «Новые технологии гарантированного предотвращения пожаров» [2].

1. Вычисляем значения промежуточных параметров:

1.1. Рассчитываем интенсивность развития загорания:

$$q = 2,5Q_{н\Psi}\vartheta_{л}^2 = 0,03 \text{ кВт/с}^2.$$

1.2. Рассчитываем время начала срабатывания извещателя:

$$t_0 = 2,1 \left( \frac{H^4}{q} \right)^{0,2} = 11,4 \text{ с}.$$

1.3. Рассчитываем температуру от начала развития загорания до момента локализации очага горения:

$$\Delta T_0 = 6,94(q^2/H^3)^{0,2} = 0,78 \text{ К}.$$

2. Рассчитываем безразмерные комплексы параметров:

– для извещателя ИП 212-52:

$$\Delta t_* = \frac{\Delta t}{t_0} = 105,3$$

$$L_* = \frac{L}{H} = 2,73$$

$$\lambda_* = 0,074 \left( \frac{C_0 S q^{0,4}}{\omega T C_{ном} H^{3,6} \vartheta_{л}^2} \right) = 6,25$$

$$t_{L_*} = \frac{1,11(\alpha H)^{1,5} L^{0,125}}{q t_0^2} = 59,33$$

– для извещателя ИП 212-81:

$$\Delta t_* = \frac{\Delta t}{t_0} = 105,3$$

$$L_* = \frac{L}{H} = 2,73$$

$$\lambda_* = 0,074 \left( \frac{C_0 S q^{0,4}}{\omega T C_{ном} H^{3,6} \vartheta_{л}^2} \right) = 12,02$$

$$t_{L*} = \frac{1,11(\alpha H)^{1,5} L^{0,125}}{qt_0^2} = 157,42$$

– для извещателя ИП 212-63а:

$$\Delta t_* = \frac{\Delta t}{t_0} = 105,3$$

$$L_* = \frac{L}{H} = 2,73$$

$$\lambda_* = 0,074 \left( \frac{C_0 S q^{0,4}}{\omega T C_{\text{ном}} H^{3,6} \vartheta_{\text{л}}^2} \right) = 21,63$$

$$t_{L*} = \frac{1,11(\alpha H)^{1,5} L^{0,125}}{qt_0^2} = 445,26$$

3. Вычислим значения коэффициентов С и Д:

– для извещателя ИП 212-52:

$$D = \frac{\lambda_* L_*^3}{8 t_{L*}} = 940,13$$

$$C = L_*^2 \left( 1 + \frac{\Delta t_*}{t_{L*}^{0,5}} \right) = 109,12$$

– для извещателя ИП 212-81:

$$D = \frac{\lambda_* L_*^3}{8 t_{L*}} = 4797,36$$

$$C = L_*^2 \left( 1 + \frac{\Delta t_*}{t_{L*}^{0,5}} \right) = 63,02$$

– для извещателя ИП 212-63а:

$$D = \frac{\lambda_* L_*^3}{8 t_{L*}} = 24424,2$$

$$C = L_*^2 \left( 1 + \frac{\Delta t_*}{t_{L*}^{0,5}} \right) = 37,47$$

4. Рассчитываем индекс i:

– для извещателя ИП 212-52:

$$i = -\frac{7}{6} + \frac{5}{6} \lg C - \frac{1}{3} \lg D = -0,46$$

– для извещателя ИП 212-81:

$$i = -\frac{7}{6} + \frac{5}{6} \lg C - \frac{1}{3} \lg D = -0,89$$

– для извещателя ИП 212-63а:

$$i = -\frac{7}{6} + \frac{5}{6} \lg C - \frac{1}{3} \lg D = -1,32$$

5. Рассчитываем значение коэффициентов В и β:

– для извещателя ИП 212-52:

$$\beta = 10^{0,4} * Д^{0,4} = 38,84$$

$$В = С \beta^{-1} = 2,81$$

– для извещателя ИП 212-81:

$$\beta = 10^{0,4} * Д^{0,4} = 74,54$$

$$В = С \beta^{-1} = 0,85$$

– для извещателя ИП 212-63а:

$$\beta = 10^{0,4} * Д^{0,4} = 142,93$$

$$В = С \beta^{-1} = 0,26$$

6. По номограммам определяем значение  $r_*^{\dot{}}$  [2] и вычисляем значение  $r_*$ :

– для извещателя ИП 212-52:

$$r_*^{\dot{}} = 0,22 \text{ (с. 45, рис. 2.3а)}$$

$$r_* = \beta^2 * r_*^{\dot{}} = 1,37$$

– для извещателя ИП 212-81:

$$r_*^{\dot{}} = 0,56 \text{ (с. 47, рис. 2.4а)}$$

$$r_* = \beta^2 * r_*^{\dot{}} = 4,8$$

– для извещателя ИП 212-63а:

$$r_*^{\dot{}} = 6,1 \text{ (с. 47, рис. 2.4а)}$$

$$r_* = \beta^2 * r_*^{\dot{}} = 72,93$$

7. Определяем теоретически необходимое количество пожарных извещателей  $N_0$ :

– извещателей ИП 212-52:

$$N_0 = \frac{S}{2H^2 r_*^2} = 4 \text{ шт.}$$

– извещателей ИП 212-81:

$$N_0 = \frac{S}{2H^2 r_*^2} = 1 \text{ шт.}$$

– извещателей ИП 212-63а:

$$N_0 = \frac{S}{2H^2 r_*^2} = 1 \text{ шт.}$$

8. Вычислим величину  $r_{*opt}$ :

– для извещателя ИП 212-52:

$$r_{*opt} = \frac{S}{2HLN_0} = 0,63$$

– для извещателя ИП 212-81:

$$r_{*opt} = \frac{S}{2HLN_0} = 2,53$$

– для извещателя ИП 212-63а:

$$r_{*opt} = \frac{S}{2HLN_0} = 2,53$$

9. Вычисляем значение целевой функции для каждого типа извещателей:

$$f_*(\text{ИП 212} - 52) = \left( \left( 4,76q^{-0,3} L_*^{0,0625} \alpha^{0,75} \left( 1 + \frac{r_{*opt}}{L_*} \right) \right) + \Delta t_* \right)^2 + \frac{\lambda_*}{2L_* r_{*opt}} = 11234,28$$

$$f_*(\text{ИП 212} - 81) = \left( \left( 4,76q^{-0,3} L_*^{0,0625} \alpha^{0,75} \left( 1 + \frac{r_{*opt}}{L_*} \right) \right) + \Delta t_* \right)^2 + \frac{\lambda_*}{2L_* r_{*opt}} = 11458,4$$

$$f_*(\text{ИП 212} - 63а) = \left( \left( 4,76q^{-0,3} L_*^{0,0625} \alpha^{0,75} \left( 1 + \frac{r_{*opt}}{L_*} \right) \right) + \Delta t_* \right)^2 + \frac{\lambda_*}{2L_* r_{*opt}} = 11714,36$$

Условие выбора  $f_* \rightarrow \min$ .

$$f_*(\text{ИП 212} - 52) < f_*(\text{ИП 212} - 81) < f_*(\text{ИП 212} - 63а)$$

Таким образом, по результатам расчетов для помещения молельного зала оптимальным является выбор извещателя ИП 212-52 в количестве четырех штук.

Следует отметить, что согласно [1] для помещения площадью  $S = 150 \text{ м}^2$  и высотой потолка  $H = 3,3 \text{ м}$  требуется четыре точечных дымовых пожарных извещателя, что соответствует результатам произведенного расчета.

С учетом вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что при расстановке пожарных извещателей в помещении в обязательном порядке необходимо соблюдать требования [1], однако оптимальный выбор может обеспечить только расчетный метод.

### Литература

1. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 15.02.2020).
2. Арутюнян Д.М. Новые технологии гарантированного предотвращения пожаров: монография / под ред. Ф.И. Шаровара. М., 2014. 232 с.
3. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382. Доступ из инф.-правового портал «Гарант».
4. СП 391.1325800.2017. Храмы православные. Правила проектирования // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 15.02.2020).
5. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123 (в ред. от 27 дек. 2018 г.). Доступ из инф.-правового портал «Гарант».

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ СОТРУДНИКОВ МЧС РОССИИ

**В.В. Сай, кандидат технических наук;**

**И.И. Каланин;**

**С.Х. Петросян.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Рассмотрены основные виды тренажерных комплексов, применяемых при подготовке сотрудников МЧС России. Выделены возможности тренажерных комплексов для обеспечения качества подготовки. Обоснована актуальность дальнейшего совершенствования набора тренажерных комплексов, применяемых в системе МЧС России.

*Ключевые слова:* тренажерные комплексы, подготовка сотрудников аварийно-спасательных формирований, разработка тренажеров для сотрудников МЧС России

## THE USE OF TRAINING FACILITIES IN THE PROCESS OF TRAINING RESCUERS

V.V. Say; I.I. Kalanin; S.H. Petrosyan.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The article considers the main types of training complexes used in the training of rescuers. Possibilities of training complexes for ensuring quality of preparation are allocated. The relevance of further improvement of training complexes set applied in the system of EMERCOM of Russia is proved.

*Keywords:* training complexes, training of emergency rescue units, development of simulators for EMERCOM employees of Russia

Деятельность сотрудников аварийно-спасательных формирований подразумевает работу в условиях различных природных и техногенных чрезвычайных ситуаций (ЧС). Одним из распространенных видов ЧС в городских условиях является разрушение зданий, что может быть следствием таких факторов, как ошибки при проектировании и строительстве, брак при изготовлении строительных материалов, нарушение правил эксплуатации зданий и технологического оборудования и иные факторы. Эффективность работы спасательных подразделений в условиях массовых разрушений, завалов напрямую зависит от степени натренированности приемов и методов работы в подобной обстановке, от специальной физической и психологической подготовки спасателя. Наилучшим способом достижения необходимого уровня подготовки является многократная отработка действий в условиях, приближенных к реальным, что может быть достигнуто путем использования специальных тренажерных комплексов.

Работу в завалах отличают следующие характерные особенности:

- ограниченное пространство для деятельности, что обуславливает специфику как физических, так и психологических нагрузок;
- необходимость использования нестандартных способов передвижения (как правило, ползком), неестественных положений тела при работе (лежа, в неудобных позах и т.д.);
- ограниченность пространства, что многократно усложняет применение средств индивидуальной защиты (СИЗ), транспортировки и применения инструмента, бережной транспортировки пострадавших;
- психологическая напряженность, связанная с недостатком свободного пространства, освещенности, запыленностью или задымленностью, наличием стрессогенного шумового фона и др.

Качество подготовки сотрудников к действиям в перечисленных условиях может быть обеспечено путем внедрения в учебный процесс специальных тренажерных комплексов, имитирующих условия работы в завалах. Детальная проработка каждого элемента тренажерного комплекса на этапе проектирования позволит приблизиться к реальным условиям в процессе выполнения учебно-тренировочных задач, а также многократно отработать каждый сценарий учебных поисково-спасательных работ (ПСР).

Применение в процессе подготовки спасателей тренажерных комплексов позволяет сформировать ряд навыков, необходимых в практической работе в условиях реальной ЧС:

- способность к длительной монотонной работе в ограниченном пространстве, при недостаточной освещенности, в неудобном положении тела и т.д.;
- способность воспринимать, анализировать и выделять полезную информацию при большом количестве помех физического и психологического характера;
- способность контролировать окружающую обстановку (элементы строительных конструкций, оборудование и т.д.);
- способность быстро, адекватно и правильно реагировать на внезапно возникающие угрозы, принимать адекватные эффективные решения в условиях нехватки времени и информации;
- способность анализировать, распределять силы и средства, самостоятельно строить оптимальные маршруты передвижения.

Кроме того, тренажерные комплексы дают возможность отработать специальные задачи, необходимые для обеспечения проведения аварийно-спасательных работ (АСР), например, испытание новых типов СИЗ, аварийно-спасательного оборудования в условиях, приближенных к реальным, отработка организации связи в ходе проведения АСР, проведение пиротехнических работ и др.

Разработка и совершенствование существующих тренажерных комплексов должны производиться в соответствии с актуальными потребностями спасательных подразделений с учетом специфики их деятельности. В Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России разработке тренажерных комплексов уделяется внимание в рамках подготовки выпускных квалификационных работ [1, 2].

В работе [2] представлен проект тренажерного комплекса, имитирующего участок местности, покрытый обломками разрушенного здания. Комплекс представляет собой систему проходов и препятствий (рис. 1), представляющую возможность изменения доступного спасателям маршрута продвижения, набора и характеристик препятствий, а также выбора альтернативных путей прохождения «лабиринта». Изменение доступных маршрутов производится путем открытия/закрытия люков между частями-секциями тренажера, что исключает привыкание обучаемых к маршруту и стимулирует активную мыслительную деятельность в ходе учебного занятия. Те же цели преследует изменение расстановки препятствий внутри «лабиринта», которое осуществляется путем замены кассет, содержащих модели наиболее характерных для техногенного завала элементов конструкций – бетонных блоков, стальной арматуры, участков кирпичной кладки, деревянных строительных конструкций и др.



Рис. 1. Примерный внешний вид тренажерного комплекса типа «Лабиринт»



Для отработки задач по поиску и транспортировке пострадавшего в контрольной точке комплекса располагается массо-габаритный макет тела человека (манекен). Спасателям необходимо в установленное контрольное время обнаружить «пострадавшего», оказать ему необходимую первую помощь согласно указанным руководителем занятия исходным данным и осуществить транспортировку методами, исключающими возможность усугубления условных травм «пострадавшего». При отработке оказания первой помощи пострадавшему целесообразно задавать в качестве исходных данных травмы, наиболее характерные для реальных пострадавших в завале – синдром длительного сдавливания, переломы и вывихи конечностей, черепно-мозговые травмы, ушибы, ссадины, размозжения и т.д.

Комплекс можно оснастить специальными техническими средствами для имитации факторов психологического воздействия на спасателя – хаотичных вспышек света различной степени яркости, шумовых воздействий, имитирующих звуки разрушающихся конструкций, взрывов, криков пострадавших, а также средствами видеоконтроля прохождения дистанции для детальной оценки и разбора действий группы обучающихся и своевременного пресечения возможных нештатных ситуаций в ходе работы в тренажере.

Тренажерный комплекс «Лабиринт» может быть использован для отработки следующих учебных задач:

- проделывание проходов в физических препятствиях, таких как элементы железобетонных, деревянных строительных конструкций, кирпичной кладке и др. с помощью гидравлического аварийно-спасательного инструмента (ГАСИ) или ручного инструмента;
- отработка навыков передвижения и транспортировки оборудования в условиях ограниченного пространства;
- отработка навыков ориентирования в трехмерном пространстве в условиях ограниченной видимости, шумовых помех, недостаточного освещения, запыленности;
- отработка навыков оказания первой помощи пострадавшему и его транспортировки в условиях стесненного пространства;
- отработка навыков работы с новыми видами ГАСИ и СИЗ.

Еще одним распространенным видом спасательных работ при ЧС как техногенного, так и природного характера являются работы на высоте. В соответствии с [3], к работам на высоте относятся работы, при которых существуют риски:

- а) связанные с возможным падением работника с высоты 1,8 м и более;
- б) связанные с возможным падением работника с высоты менее 1,8 м, если работа проводится над машинами или механизмами, поверхностью жидкости или сыпучих мелкодисперсных материалов, выступающими предметами.

В рамках выпускной квалификационной работы [1] разработан тренажер высотно-десантной подготовки (ВДП). Тренажер включает в себя следующие учебные точки:

- зона промышленного альпинизма (имитация работы на стене здания);
- зона горного альпинизма (имитация работы на скальной местности, наведение переправы через препятствие, организация и проведение транспортировки пострадавшего с помощью альпинистского оборудования);
- зона отработки беспарашютного десантирования с вертолета;
- зона для отработки нормативов по альпинистской подготовке (прохождение траверсом с перестёжкой страховки, подъём/спуск с помощью специальных устройств и др.)

Тренажер ВДП позволяет отработать:

- навыки практического применения специального оборудования для промышленного альпинизма;
- приемы организации страховки спасателя и инструмента;
- приемы и способы преодоления препятствий различной категории сложности в горах;
- транспортировку пострадавших с помощью средств альпинистского снаряжения;
- правильную подгонку экипировки для беспарашютного десантирования с вертолётa, навыки выхода из вертолета;

- десантирование в сложных условиях (на площадки ограниченных размеров, ночью, с грузом или в специальном снаряжении, на неподготовленную площадку и др.);
- подачу воздушных сигналов «Земля-Воздух»;
- применение летательных средств для транспортировки пострадавших.

В работе [4] рассмотрены тренировочные комплексы, моделирующие условия непригодной для дыхания среды (НДС), используемые при подготовке газодымозащитников – теплодымокамеры (ТДК). Наиболее распространенными комплексами являются ТДК ПТС «Грот», огневой полигон (ОП) ПТС «Лава», огневой тренажерный комплекс (ОТК) ПТС «Уголёк». Особенностью этих тренажерных комплексов является возможность моделирования таких опасных факторов пожара, как открытое пламя и искры, задымление, ведущее к снижению видимости, повышенная температура, что позволяет не только отработать проведение АСР с применением средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения, но и подготовить организм к специфическим нагрузкам, возникающим в процессе тушения пожара.

Как показывает анализ статистических данных, более трети учебных тренажерных комплексов, действующих в субъектах Российской Федерации, имеют срок эксплуатации более 10 лет, что сказывается на их техническом состоянии, а также обуславливает аспект морального устаревания данных комплексов. При этом анализ профессиональной деятельности сотрудников МЧС России (на примере выпускников ФГБОУ ВО Ивановской пожарно-спасательной академии) показывает, что личный состав, проходивший в период обучения в вузе тренировки в УТК, демонстрируют более высокие профессиональные навыки, чем личный состав, не проходивший аналогичных тренировок [4]. Таким образом, совершенствование, разработка и внедрение в обучение тренажерных комплексов, ориентированных на отработку навыков в области деятельности пожарных подразделений, также является актуальной задачей и может быть использовано в качестве перспективных тем выпускных квалификационных работ в вузах МЧС России.

Широкие перспективы для совершенствования и разработки многофункциональных тренажерных комплексов для подготовки сотрудников МЧС России представляет такая категория тренажеров, как макеты различных видов транспорта – автомобильного, железнодорожного, морского и авиатранспорта. Также актуальное направление развития представляют комплексы, имитирующие элементы технологического процесса промышленных предприятий. Целесообразность их внедрения обусловлена многообразием и спецификой технологического оборудования, применяемого на предприятиях, находящихся в районе ответственности соответствующих пожарно-спасательных и спасательных подразделений. Подобные комплексы позволят отработать навыки работы с конкретным технологическим оборудованием и максимизировать эффективность подготовки спасателей.

По результатам анализа существующих в настоящее время тренажерных комплексов можно заключить, что данные комплексы являются незаменимыми для качественной и полноценной подготовки сотрудников аварийно-спасательных и пожарно-спасательных формирований. К основным преимуществам тренажерных комплексов можно отнести следующие возможности:

- отработка действий в условиях, максимально приближенных к реальной обстановке;
- тренировка групп мышц, не задействованных при выполнении типичных упражнений;
- одновременное развитие как физических, так и психологических качеств обучаемых;
- реализация большого числа сценариев учебно-тренировочных задач;
- испытание новых видов или способов применения аварийно-спасательного инструмента в условиях, приближенных к реальным.

При этом для обеспечения максимальной эффективности при подготовке сотрудников МЧС России необходимо постоянное совершенствование используемых тренажерных комплексов, а также разработка новых в соответствии с изменяющимися требованиями к набору умений и навыков сотрудников МЧС России.

## Литература

1. Думчева М.М. Разработка учебно-тренажерного полигона для отработки навыков по проведению аварийно-спасательных работ на высоте курсантами и сотрудниками Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России: дипломная работа специалиста. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2018.
2. Макурков А.О. Разработка учебно-тренажерного полигона для отработки навыков по проведению аварийно-спасательных работ в условиях чрезвычайной ситуации техногенного характера курсантами и сотрудниками Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России: дипломная работа специалиста. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2018.
3. Об утверждении Правил по охране труда при работе на высоте: приказ Мин. труда и соц. защиты Рос. Федерации от 28 марта 2014 г. № 155н. Доступ из инф.-правового портал «Гарант».
4. Практическое использование учебно-тренировочных комплексов для подготовки пожарных и спасателей / М.Ю. Легошин [и др.] // Международный науч.-исслед. журнал. 2017. № 11-4 (65). С. 44–51.
5. Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей: Федер. закон от 22 авг. 1995 г. № 151-ФЗ. Доступ из инф.-правового портал «Гарант».
6. Сборник примерных программ профессиональной подготовки и дополнительного профессионального образования МЧС России. Программы подготовки спасателей. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2016. Т. 4. 268 с.
7. Одинцов Л.Г. Разработка тренажеров для подготовки спасателей // Технологии гражданской безопасности. 2011. № 4 (30). Т. 8. С. 16–21.



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ахунова Дарья Геннадьевна** – магистрант СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149);

**Буйневич Михаил Викторович** – проф. каф. прикл. мат. и информ. технол. СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), тел.: (812) 369-69-70, д-р. техн. наук, проф.;

**Власов Сергей Сергеевич** – адъюнкт СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149);

**Воронин Сергей Владимирович** – доц. каф. пож. безопасн. технол. проц. и пр-в СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), канд. техн. наук;

**Григорьева Елена Сергеевна** – магистрант СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149);

**Дахкильгов Мовлатгири Султангиреевич** – студент ин-та заоч. и дистанц. обучения СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149);

**Ершова Мария Игоревна** – магистрант СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149);

**Жандаров А.З.** – зам. нач. отд. надзор. деят. и профилакт. работы по г. Назрань и Назрановскому р-ну упр. надзор. деят. и профилакт. работы Гл. упр. МЧС России по Респ. Ингушетия;

**Загайнов Константин Владимирович** – студент ин-та заоч. и дистанц. обучения СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149);

**Иванов Алексей Владимирович** – доц. каф. пож. безопасн. технол. проц. и пр-в СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), канд. техн. наук, доц.;

**Иванов Анатолий Николаевич** – проф. каф. пож. безопасн. зданий и автоматиз. систем пожаротушения СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), канд. техн. наук, доц.;

**Каланин Игорь Иванович** – ст. препод. каф. спец. подгот. СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149);

**Калистова Е.А.** – ст. инж. отд. мероприятий гражд. обороны и подгот. населения Гл. упр. МЧС России по Респ. Марий Эл;

**Кузьмин Анатолий Алексеевич** – доц. каф. физ.-техн. основ обеспеч. пож. безопасн. СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), канд. пед. наук, доц.;

**Лабинский Александр Юрьевич** – доц. каф. прикл. мат. и информ. технол. СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), тел.: (812) 369-69-70, канд. техн. наук, доц.;

**Минкин Дмитрий Алексеевич** – доц. каф. физ.-техн. основ обеспеч. пож. безопасн. СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), канд. пед. наук, доц.;

**Петросян Самвел Хачатурович** – препод. каф. спец. подгот. СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149);

**Романов Николай Николаевич** – доц. каф. физ.-техн. основ обеспеч. пож. безопасн. СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: romanov\_n.n@igps.ru, канд. техн. наук, доц.;

**Сай Василий Валерьевич** – нач. каф. спец. подгот. СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), канд. техн. наук, доц.;

**Самойленко Сергей Анатольевич** – студент ин-та заоч. и дистанц. обучения СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149);

**Скрипник Игорь Леонидович** – проф. каф. пож. безопасн. технол. проц. и пр-в СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), канд. техн. наук, доц.;

**Трубилко Андрей Игоревич** – доц. каф. физ.-техн. основ обеспеч. пож. безопасн. СПб ун-та ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), канд. физ.-техн. наук, доц.



---

---

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СПРАВКА

---

---

Старейшее учебное заведение пожарно-технического профиля России образовано 18 октября 1906 г., когда на основании решения Городской Думы Санкт-Петербурга были открыты Курсы пожарных техников. Наряду с подготовкой пожарных специалистов, учебному заведению вменялось в обязанность заниматься обобщением и систематизацией пожарно-технических знаний, оформлением их в отдельные учебные дисциплины. Именно здесь были созданы первые отечественные учебники, по которым обучались все пожарные специалисты страны.

Учебным заведением за вековую историю подготовлено более 40 тыс. специалистов, которых всегда отличали не только высокие профессиональные знания, но и беспредельная преданность профессии пожарного и верность присяге. Свидетельство тому – целый ряд сотрудников и выпускников вуза, награжденных высшими наградами страны, среди них: кавалеры Георгиевских крестов, четыре Героя Советского Союза и Герой России. Далеко не случаен тот факт, что среди руководящего состава пожарной охраны страны всегда было много выпускников учебного заведения.

Сегодня федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» – современный научно-образовательный комплекс, интегрированный в российское и мировое научно-образовательное пространство. Университет по разным формам обучения – очной, заочной и заочной с применением дистанционных технологий – осуществляет обучение по 25 программам среднего, высшего образования, а также подготовку специалистов высшей квалификации: докторантов, адъюнктов, аспирантов, переподготовку и повышение квалификации специалистов более 30 категорий сотрудников МЧС России.

Начальник университета – генерал-лейтенант внутренней службы, кандидат экономических наук Чижиков Эдуард Николаевич.

Основным направлением деятельности университета является подготовка специалистов в рамках специальности «Пожарная безопасность». Вместе с тем организована подготовка и по другим специальностям, востребованным в системе МЧС России. Это специалисты в области системного анализа и управления, законодательного обеспечения и правового регулирования деятельности МЧС России, психологии риска и чрезвычайных ситуаций, экономической безопасности в подразделениях МЧС России, пожарно-технической экспертизы и дознания. По инновационным программам подготовки осуществляется обучение специалистов по специализациям «Руководство проведением спасательных операций особого риска» и «Проведение чрезвычайных гуманитарных операций» со знанием иностранных языков, а также подготовка специалистов для военизированных горноспасательных частей по специальности «Горное дело».

Широта научных интересов, высокий профессионализм, большой опыт научно-педагогической деятельности, владение современными методами научных исследований позволяют коллективу университета преумножать научный и научно-педагогический потенциал вуза, обеспечивать непрерывность и преемственность образовательного процесса. Сегодня в университете свои знания и огромный опыт передают: 7 заслуженных деятелей науки Российской Федерации, 11 заслуженных работников высшей школы Российской Федерации, 2 заслуженных юриста Российской Федерации, заслуженные изобретатели Российской Федерации и СССР. Подготовку специалистов высокой квалификации в настоящее время осуществляют 56 докторов наук, 277 кандидатов наук, 58 профессоров, 158 доцентов, 12 академиков отраслевых академий, 8 членов-корреспондентов отраслевых академий, 5 старших научных сотрудников, 6 почетных работников высшего

профессионального образования Российской Федерации, 1 почетный работник науки и техники Российской Федерации, 2 почетных радиста Российской Федерации.

В составе университета:

- 32 кафедры;
- Институт безопасности жизнедеятельности;
- Институт заочного и дистанционного обучения;
- Институт нравственно-патриотического и эстетического развития;
- Институт профессиональной подготовки;
- Институт развития;
- Научно-исследовательский институт перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности;
- Дальневосточная пожарно-спасательная академия – филиал университета (ДВПСА);
- пять факультетов: факультет инженерно-технический, факультет экономики и права, факультет подготовки кадров высшей квалификации, факультет пожарной безопасности (подразделение ДВПСА), факультет дополнительного профессионального образования (подразделение ДВПСА).

Институт безопасности жизнедеятельности осуществляет образовательную деятельность по программам высшего образования по договорам об оказании платных образовательных услуг.

Приоритетным направлением в работе Института заочного и дистанционного обучения является подготовка кадров начальствующего состава для замещения соответствующих должностей в подразделениях МЧС России.

Институт развития реализует дополнительные профессиональные программы по повышению квалификации и профессиональной переподготовке в рамках выполнения государственного заказа МЧС России для совершенствования и развития системы кадрового обеспечения, а также на договорной основе.

Научно-исследовательский институт перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности осуществляет реализацию государственной научно-технической политики, изучение и решение научно-технических проблем, информационного и методического обеспечения в области пожарной безопасности. Основные направления деятельности научно-исследовательского института: организационное и научно-методическое руководство судебно-экспертными учреждениями федеральной противопожарной службы МЧС России; сертификация продукции в области пожарной безопасности; проведение испытаний и разработка научно-технической продукции в области пожарной безопасности; проведение расчетов пожарного риска и расчетов динамики пожара с использованием компьютерных программ.

Факультет инженерно-технический осуществляет подготовку специалистов по специальностям: «Пожарная безопасность» (специализации: «Пожаротушение», «Государственный пожарный надзор», «Руководство проведением спасательных операций особого риска», «Проведение чрезвычайных гуманитарных операций»), «Судебная экспертиза», по направлениям подготовки: «Системный анализ и управление», «Техносферная безопасность».

Факультет экономики и права осуществляет подготовку специалистов по специальностям: «Правовое обеспечение национальной безопасности», «Пожарная безопасность» (специализация «Пожарная безопасность объектов минерально-сырьевого комплекса»), «Судебная экспертиза», «Горное дело» и по направлениям подготовки «Техносферная безопасность» и «Системный анализ и управление».

Факультет подготовки кадров высшей квалификации осуществляет подготовку докторантов, адъюнктов, аспирантов по очной и заочной формам обучения.

Университет имеет представительства в городах: Выборг (Ленинградская область), Вытегра, Горячий Ключ (Краснодарский край), Мурманск, Петрозаводск, Пятигорск, Севастополь, Стрежевой, Сыктывкар, Тюмень, Уфа; представительства университета

за рубежом: г. Алма-Ата (Республика Казахстан), г. Баку (Азербайджанская Республика), г. Бар (Черногория), г. Ниш (Сербия).

Общее количество обучающихся в университете по всем специальностям, направлениям подготовки, среднему общему образованию составляет 7 057 человек. Ежегодный выпуск составляет более 1 100 специалистов.

В университете действует два диссертационных совета по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по техническим и экономическим наукам.

Ежегодно университет проводит научно-практические конференции различного уровня: Всероссийскую научно-практическую конференцию «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы и перспективы», Международную научно-практическую конференцию «Подготовка кадров в системе предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций». Совместно с Северо-Западным отделением Научного Совета РАН по горению и взрыву, Российской академией ракетных и артиллерийских наук (РАРАН), Балтийским государственным техническим университетом «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и Российской секцией Международного института горения на базе университета проводится Международная научно-практическая конференция «Комплексная безопасность и физическая защита». Также университет принимает активное участие в организации и проведении Всероссийского форума МЧС России и общественных организаций «Общество за безопасность».

Университет ежегодно принимает участие в выставках, организованных МЧС России и другими ведомствами и организациями. Традиционно большим интересом пользуется выставочная экспозиция университета на Международном салоне средств обеспечения безопасности «Комплексная безопасность», Петербургском международном экономическом форуме, Международном форуме «Арктика: настоящее и будущее».

Международная деятельность вуза направлена на всестороннюю интеграцию университета в международное образовательное пространство. На сегодняшний момент университет имеет 18 действующих соглашений о сотрудничестве с зарубежными учебными заведениями и организациями, среди которых центры подготовки пожарных и спасателей Германии, КНР, Франции, Финляндии.

В университете обучаются иностранные курсанты из числа сотрудников Государственной противопожарной службы МЧС Кыргызской Республики и Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан в пределах квот на основании межправительственных соглашений и постановления Правительства Российской Федерации от 7 декабря 1996 г. № 1448 «О подготовке лиц офицерского состава и специалистов для правоохранительных органов и таможенных служб государств-участников СНГ в образовательных учреждениях высшего профессионального образования Российской Федерации». В настоящее время в университете проходят обучение 30 сотрудников Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан и 15 сотрудников МЧС Кыргызской Республики.

В соответствии с двусторонними соглашениями университет осуществляет обучение по программам повышения квалификации. Регулярно проходят обучение в университете специалисты Российско-сербского гуманитарного центра, Российско-армянского центра гуманитарного реагирования, Международной организации гражданской обороны, Министерства нефти Исламской Республики Иран, пожарно-спасательных служб Финляндии, Туниса, Республики Корея и других стран.

Преподаватели, курсанты и студенты университета имеют возможность проходить стажировку за рубежом. За последнее время стажировки для профессорско-преподавательского состава и обучающихся в университете были организованы в Германии, Сербии, Финляндии, Швеции.

В университете имеются возможности для повышения уровня знания английского языка. Организовано обучение по программе дополнительного профессионального

образования «Переводчик в сфере профессиональной коммуникации» студентов, курсантов, адъюнктов и сотрудников.

Компьютерный парк университета составляет более 1 200 единиц. Для информационного обеспечения образовательной деятельности функционирует единая локальная сеть с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета, справочно-правовую систему «КонсультантПлюс», систему «Антиплагиат». Компьютерные классы позволяют обучающимся работать в сети Интернет, с помощью которой обеспечивается выход на российские и международные информационные сайты, что позволяет значительно расширить возможности учебного, учебно-методического и научно-методического процесса.

Нарастающая сложность и комплексность современных задач заметно повышают требования к организации образовательного процесса. Сегодня университет реализует программы обучения с применением технологий дистанционного обучения.

Библиотека университета соответствует всем современным требованиям. Фонды библиотеки университета составляют более 350 700 экземпляров литературы по всем отраслям знаний. Они имеют информационное обеспечение и объединены в единую локальную сеть. Все процессы автоматизированы. Установлена библиотечная программа «Ирбис». В библиотеке осуществляется электронная книговыдача. Это дает возможность в кратчайшие сроки довести книгу до пользователя.

Читальные залы (общий и профессорский) библиотеки оснащены компьютерами с выходом в Интернет, Интранет, НЦУКС и локальную сеть университета. Создана и функционирует Электронная библиотека, она интегрирована с электронным каталогом. В сети Интранет работает Единая ведомственная электронная библиотека МЧС России, объединяющая библиотеки системы МЧС России.

В Электронной библиотеке оцифровано 2/3 учебного и научного фонда. К электронной библиотеке подключены: Дальневосточный филиал и библиотека Арктического спасательного учебно-научного центра «Вытегра». Имеется доступ к Президентской библиотеке им. Б.Н. Ельцина. Заключены договоры с ЭБС IPRbooks и ЭБС «Лань» на пользование и просмотр учебной и научной литературы в электронном виде. Имеется 8 000 точек доступа.

В фондах библиотеки насчитывается более 150 экземпляров редких и ценных изданий. Библиотека располагает богатым фондом периодических изданий, их число составляет 8 121 экземпляр. На 2019 г., в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта, выписано 80 наименований журналов и газет. Все поступающие периодические издания расписываются библиографом для электронных каталога и картотеки. Издания периодической печати активно используются читателями в учебной и научно-исследовательской деятельности. На базе библиотеки создана профессорская библиотека и профессорский клуб вуза.

Полиграфический центр университета оснащен современным типографским оборудованием для полноцветной печати, позволяющим обеспечивать не только заказы на печатную продукцию университета, но и единый план изготовления печатной продукции МЧС России. Университет издает 8 научных журналов, публикуются материалы ряда международных и всероссийских научных мероприятий, сборники научных трудов профессорско-преподавательского состава университета. Издания университета соответствуют требованиям законодательства Российской Федерации и включены в электронную базу Научной электронной библиотеки для определения Российского индекса научного цитирования, а также имеют международный индекс (ISSN). Научно-аналитический журнал «Проблемы управления рисками в техносфере» и электронный «Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России» включены в утвержденный решением Высшей аттестационной комиссии «Перечень рецензируемых научных журналов, в которых публикуются основные научные результаты



диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Курсанты университета проходят обучение по программе первоначальной подготовки спасателей.

На базе Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России 1 июля 2013 г. открыт Кадетский пожарно-спасательный корпус.

Кадетский пожарно-спасательный корпус осуществляет подготовку кадет по общеобразовательным программам среднего общего образования с учетом дополнительных образовательных программ. Основные особенности деятельности корпуса – интеллектуальное, культурное, физическое и духовно-нравственное развитие кадет, их адаптация к жизни в обществе, создание основы для подготовки несовершеннолетних граждан к служению Отечеству на поприще государственной гражданской, военной, правоохранительной и муниципальной службы.

В университете большое внимание уделяется спорту. Команды, состоящие из преподавателей, курсантов и слушателей, – постоянные участники различных спортивных турниров, проводимых как в России, так и за рубежом. Слушатели и курсанты университета являются членами сборных команд МЧС России по различным видам спорта.

Деятельность команды университета по пожарно-прикладному спорту (ППС) включает в себя участие в чемпионатах России среди вузов (зимний и летний), в зональных соревнованиях и чемпионате России, а также проведение бесед и консультаций, оказание практической помощи юным пожарным кадетам и спасателям при проведении тренировок по ППС.

В университете создан спортивный клуб «Невские львы», в состав которого входят команды по пожарно-прикладному и аварийно-спасательному спорту, хоккею, американскому футболу, волейболу, баскетболу, силовым единоборствам и др. В составе сборных команд университета – чемпионы и призеры мировых первенств и международных турниров.

Курсанты и слушатели имеют прекрасные возможности для повышения своего культурного уровня, развития творческих способностей в созданном в университете Институте нравственно-патриотического и эстетического развития. Творческий коллектив университета принимает активное участие в ведомственных, городских и университетских мероприятиях, направленных на эстетическое и патриотическое воспитание молодежи, а также занимает призовые места в конкурсах, проводимых на уровне университета, города и МЧС России. На каждом курсе организована работа по созданию и развитию творческих объединений по различным направлениям: студия вокала, студия танцев, клуб веселых и находчивых. Для курсантов и студентов действует студия ораторского искусства, команда технического обеспечения, духовой оркестр.

На территории учебного заведения создается музей истории Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, в котором обучающиеся и сотрудники, а также гости университета смогут познакомиться со всеми этапами становления учебного заведения – от курсов пожарных техников до университета.

В Санкт-Петербургском университете Государственной противопожарной службы МЧС России созданы все условия для подготовки высококвалифицированных специалистов как для Государственной противопожарной службы, так и в целом для МЧС России.



---

---

# АВТОРАМ ЖУРНАЛА

## «ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ РИСКИ»

### (ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ)

---

---

Материалы, публикуемые в журнале, должны отвечать профилю журнала, обладать несомненной новизной, относиться к вопросу проблемного назначения, иметь прикладное значение и теоретическое обоснование и быть оформлены по следующим правилам:

**1. Материалы** для публикации представляются куратору журнала. Материал должен сопровождаться:

а) для **сотрудников** СПб УГПС – *выпиской* из протокола заседания кафедры о целесообразности публикации и отсутствии материалов, запрещенных к публикации в открытой печати, *рецензией от члена редакционного совета* (коллегии). По желанию прилагается вторая рецензия от специалиста соответствующего профиля, имеющего ученую степень;

б) для авторов **сторонних** организаций – сопроводительным *письмом* от учреждения на имя начальника университета и *разрешением* на публикацию в открытой печати, *рецензией* от специалиста по соответствующему статье профилю, имеющему ученую степень;

в) *электронной версией* статьи, представленной в формате редактора Microsoft Word (версия не ниже 2003). Название файла должно быть следующим:

Автор1, Автор2 – Первые три слова названия статьи.doc, например: **Иванов – Анализ существующей практики.doc**;

г) *плата* с адъюнктов и аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

**2. Статьи**, включая рисунки и подписи к ним, список литературы, должны иметь объем от 8 до 13 машинописных страниц.

#### **3. Оформление текста:**

а) текст материала для публикации должен быть тщательно отредактирован автором;

б) текст на одной стороне листа формата А4 набирается на компьютере (шрифт Times New Roman 14, *интервал 1,5*, без переносов, в одну колонку, *все поля по 2 см*, нумерация страниц внизу посередине);

в) на первой странице авторского материала должны быть напечатаны **на русском и английском языках**: название (прописными буквами, полужирным шрифтом, без подчеркивания); инициалы и фамилии *авторов (не более трех)*; ученая степень, ученое звание, почетное звание; место работы (название учреждения), аннотация, ключевые слова.

*Требования к аннотации.* Аннотация должна быть краткой, информативной, отражать основные положения и выводы представляемой к публикации статьи, а также включать полученные результаты, используемые методы и другие особенности работы. Примерный объем аннотации 40–70 слов.

#### **4. Оформление формул в тексте:**

а) формулы должны быть набраны на компьютере в редакторе формул Microsoft Word (Equation), размер шрифта эквивалентен 14 (Times New Roman);

б) в формулах рекомендуется использовать буквы латинского и греческого алфавитов (курсивом);

в) формулы печатаются по центру, номер – у правого поля страницы (нумеровать следует только формулы, упоминаемые в тексте).

#### **5. Оформление рисунков и таблиц:**

а) рисунки необходимо выделять отдельным блоком для удобства переноса в тексте или вставлять из файла, выполненного в любом из общепринятых графических редакторов, под рисунком ставится: Рис. 2. и далее следуют пояснения;

- б) если в тексте не одна таблица, то их следует пронумеровать (сначала пишется: Таблица 2, на той же строке название таблицы полужирно, и далее следует сама таблица);
- в) если в тексте одна таблица или один рисунок, то их нумеровать не следует;
- г) таблицы должны иметь «вертикальное» построение;
- д) в тексте ссылки на таблицы и рисунки делаются следующим образом: рис. 2, табл. 4, если всего один рисунок или одна таблица, то слово пишется целиком: таблица, рисунок.

#### **6. Оформление библиографии (списка литературы):**

- а) в тексте ссылки на цитируемую литературу обозначаются порядковой цифрой в квадратных скобках;
- б) список должен содержать цитируемую литературу, пронумерованную в порядке ее упоминания в тексте.

Пристатейные библиографические списки должны соответствовать ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Примеры оформления списка литературы:

#### **Литература**

1. Адорно Т.В. К логике социальных наук // Вопросы философии. 1992. № 10. С. 76–86.
2. Информационные аналитические признаки диагностики нефтепродуктов на местах чрезвычайных ситуаций / М.А. Галишев [и др.] // Жизнь и безопасность. 2004. № 3–4. С. 134–137.
3. Щетинский Е.А. Тушение лесных пожаров: пособ. для лесных пожарных. 5-е изд., перераб. и доп. М.: ВНИИЛМ, 2002.
4. Грэждяну П.М., Авербух И.Ш. Вариант вероятностного метода оценки оползнеопасности территории // Современные методы прогноза оползневого процесса: сб. науч. тр. М.: Наука, 1981. С. 61–63.
5. Минаев В.А., Фаддеев А.О. Безопасность и отдых: системный взгляд на проблему рисков // Туризм и рекреация: тр. II Междунар. конф. / МГУ им. М.В. Ломоносова. М., 2007. С. 329–334.
6. Белоус Н.А. Прагматическая реализация коммуникативных стратегий в конфликтном дискурсе // Мир лингвистики и коммуникации: электрон. науч. журн. 2006. № 4. URL: [http://www.tverlingua.by.ru/archive/005/5\\_3\\_1.htm](http://www.tverlingua.by.ru/archive/005/5_3_1.htm) (дата обращения: 15.12.2007).
7. Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей: Федер. закон Рос. Федерации от 22 авг. 1995 г. № 151-ФЗ // Собр. законодательства Рос. Федерации. 1995. № 35. Ст. 3 503.

#### **7. Оформление раздела «Сведения об авторах»**

Сведения об авторах прилагаются в конце статьи и включают: Ф.И.О. (полностью), должность, место работы с указанием адреса и его почтового индекса; номер телефона, адрес электронной почты, ученую степень, ученое звание, почетное звание.

*Статья должна быть подписана авторами и указаны контактные телефоны.*

**Внимание авторов: материалы, оформленные без соблюдения настоящих требований, будут возвращаться на доработку.**

**Редакция оставляет за собой право направлять статьи на дополнительное, анонимное рецензирование.**



**МЧС РОССИИ**  
**ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет**  
**Государственной противопожарной службы»**

Научно-аналитический журнал

**Природные и техногенные риски**  
**(физико-математические и прикладные аспекты)**

**№ 1 (33) – 2020**

Выпускающий редактор  
А.В. Домничева

---

Подписано в печать 23.03.2020. Формат 60×84<sub>1/8</sub>.

Усл.-печ. 10,5 л. Тираж 1000 экз. Зак. №

---

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России  
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149