

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ
ПОЖАРУТУШЕНИЯ.
ПАРАМЕТРЫ ЭФФЕКТИВНОГО
ТУШЕНИЯ





УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

Журнал издается с 1992 г.,
периодичность — 6 номеров в год.

СМИ зарегистрировано Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых
коммуникаций — свидетельство
ПИ № ФС 77-79402 от 2 ноября 2020 г.

Префикс DOI: 10.22227

РЕДАКЦИЯ:

Выпускающий редактор **Дядичева А.А.**
Редактор **Корзухина Л.Б.**
Перевод на английский **Юденкова О.В.**
Корректор **Ермихина О.В.**
Дизайнер **Алейникова Ю.З.**

Адрес редакции:

129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

Адрес для переписки:

129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26,
корп. 8

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

Журнал включен в перечень ведущих
рецензируемых научных журналов и изданий,
рекомендованных ВАК России для публикации
трудов соискателей ученых степеней,
в Реферативный журнал и базы данных
ВИНИТИ РАН, в базу данных Российского
индекса научного цитирования (РИНЦ),
в Справочно-библиографическую службу EBSCO.
Сведения о журнале ежегодно публикуются
в Международной справочной системе
по периодическим и продолжающимся изданиям
«Ulrich's Periodicals Directory». Переводные
версии статей журнала входят в Международный
реферативный журнал Chemical Abstracts.

Перепечатка материалов журнала
«Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion
Safety» только по согласованию с редакцией.
При цитировании ссылка не обязательна.
Авторы и рекламодатели несут ответственность
за содержание представленных в редакцию
материалов и публикацию их в открытой печати.
Мнение редакции не всегда совпадает
с мнением авторов опубликованных материалов.

Подписано в печать 25.08.2023.

Выход в свет 29.08.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии

Издательства МИСИ – МГСУ

129337, Москва, Ярославское ш., д. 26, корп. 8.

Фото для оформления журнала взяты с сайтов: www.ro.wikipedia.org,
www.krd.energo-e.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Корольченко Д.А., д. т. н., академик МАНЭБ (Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет, Москва, Россия)

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Мольков В.В., д. т. н., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунбаби, Велико-
британия)

Стрижак П.А., д. ф.-м. н., профессор (Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Томск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бакиров И.К., к. т. н. (Уфимский государственный нефтяной технический универси-
тет, Уфа, Россия, Республика Башкортостан)

Барбин Н.М., д. т. н., к. х. н., профессор, почетный работник науки и техники
РФ (Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России,
Екатеринбург, Россия)

Берлин А.А., д. х. н., профессор, академик РАН (Федеральный исследовательский
центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия)

Богданова В.В., д. х. н., профессор (Научно-исследовательский институт физико-
химических проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь)

Брушлинский Н.Н., д. т. н., профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель
науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
Москва, Россия)

Вагнер П., д. т. н. (Академия пожарной службы Берлина, Берлин, Германия)

Калач А.В., д. х. н., профессор (Воронежский государственный технический универ-
ситет, Воронеж, Россия)

Кузнецов С.В., д. ф.-м. н., профессор (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлин-
ского Российской академии наук, Москва, Россия)

Ложкин В.Н., д. т. н., профессор (Санкт-Петербургский университет Государствен-
ной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, Россия)

Малыгин И.Г., д. т. н., профессор (Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия)

Поландов Ю.Х., д. т. н., профессор (Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет, Москва, Россия)

Пузач С.В., д. т. н., профессор, член-корреспондент НАНПБ, заслуженный дея-
тель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
Москва, Россия)

Раимбеков К.Ж., к. ф.-м. н. (Кокшетауский технический институт Комитета по чрез-
вычайным ситуациям МВД Республики Казахстан, Кокшетау, Казахстан)

Рестас А. (Институт управления при ЧС Национального университета Государствен-
ной службы, Будапешт, Венгрия)

Серков Б.Б., д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ (Академия Государ-
ственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

Тамразян А.Г., д. т. н., профессор, действительный член Российской инженерной
академии (РИА), советник РААСН (Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет, Москва, Россия)

Таранцев А.А., д. т. н., профессор (Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия)

Христов Б., д. т. н., профессор (Берлинский институт техники и экономики, Берлин,
Германия)

Челани А. (Миланский технический университет, Милан, Италия)

Чирик Р.М., д. т. н., профессор (Высшая техническая школа, Нови Сад, Сербия)

Шебеко Ю.Н., д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ (ВНИИПО МЧС России,
Балашиха Московской обл., Россия)

Шоус Р. (Университет штата Пенсильвания, Юниверсити-Парк, Пенсильвания, США)

Якуш С.Е., д. ф.-м. н. (Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской
академии наук, Москва, Россия)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

В.И. ПРИСАДКОВ, С.В. МУСЛАКОВА,
А.А. АБАШКИН, К.В. ПРИСАДКОВ
Имитационное моделирование и критерии решений
по противопожарной защите общественных зданий

5

V.I. PRISADKOV, S.V. MUSLAKOVA,
A.A. ABASHKIN, K.V. PRISADKOV
Simulation modelling and decision criteria
for fire protection of public buildings

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

Ю.Х. ПОЛАНДОВ
Задача о гистерезисе в работе
предохранительного клапана прямого действия

15

Yu.Kh. POLANDOV
Problem of hysteresis in the operation
of direct-action safety valve

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

Ю.Н. ШЕБЕКО
Особенности поведения резервуаров со сжиженным
природным газом (СПГ) в очаге пожара

31

Yu.N. SHEBEKO
Behavior of liquefied natural gas tanks
in a point of fire origin

А.А. ГАСИЕВ, В.В. ПАВЛОВ, А.В. ГОМОЗОВ
Особенности обеспечения пожарной безопасности
при проектировании строительных конструкций
модульных зданий

42

A.A. GASIEV, V.V. PAVLOV, A.V. GOMOZOV
Fire safety in the design
of building structures
of modular buildings

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

Ю.И. ГОРБАНЬ, С.Г. НЕМЧИНОВ,
С.Г. ЦАРИЧЕНКО, А.А. ТУРОВСКИЙ
Роботизированные установки пожаротушения.
Параметры эффективного тушения

58

Yu.I. GORBAN, S.G. NEMCHINOV,
S.G. TSARICHENKO, A.A. TUROVSKIY
Robotic fire-extinguishing systems.
Effective extinguishing parameters

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

ECONOMICS AND FIRE AND COMPLEX SAFETY CONTROLE

Н.В. КАМЕНЕЦКАЯ, А.П. КОРОЛЬКОВ,
С.А. НЕФЕДЬЕВ, Ю.Д. МОТОРЫГИН
Оптимизация управленческих решений
при проведении поисково-спасательных операций

68

N.V. KAMENETSKAYA, A.P. KOROLKOV,
S.A. NEFEDEV, Yu.D. MOTORYGIN
Optimization of management decisions
during search and rescue operations

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО, В.И. СЕЛИВЁРСТОВ, А.Б. САЕНКОВА
Методика проведения экспериментального исследования
тушения струйного горения газа автоматическими
установками газопорошкового пожаротушения

77

D.A. KOROLCHENKO, V.I. SELIVERSTOV, A.B. SAENKOVA
Methodology for experimental investigation of gas jet
fire suppression using automatic gas-powder fire
extinguishing systems

ВОПРОС – ОТВЕТ

QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Современные способы тушения
литий-ионных аккумуляторов. Часть 4

86

A.S. KHARLAMENKOV
Modern methods of extinguishing lithium-ion batteries.
Part 4

ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ ЖУРНАЛА –
ознакомление международного сообщества
с результатами исследований, проводимых
российскими и зарубежными учеными
в области комплексной безопасности.

THE MAIN AIM OF THE JOURNAL –
acquaintance of the international community
with results of the researches conducted
by the Russian and foreign scientists in the field
of integrated security.



Моделирование решений по противопожарной защите зданий

Стр. 5



Стр. 31

Особенности поведения резервуаров со СПГ в очаге пожара



Роботизированные установки пожаротушения

Стр. 58



Стр. 77

Тушение струйного горения газа автоматическими установками

Стр. 86



Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов



FOUNDER and PUBLISHER —

Federal State Budgetary Educational
Institution of Higher Education Moscow
State University of Civil Engineering
(National Research University) (MGSU)

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

Publication is registered by the Federal
Service for Supervision of Communications,
Information Technology, and Mass Media
of Russia. Registration certificate PI
No. FS 77-79402 on November 2, 2020.

DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Korzukhina L.B.**

Russian-English translation **Yudenkova O.V.**

Corrector **Ermikhina O.V.**

Layout **Aleynikova Y.Z.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Corresponding to: Yaroslavskoe Shosse,
26/8, Moscow, 121352, Russia.

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

"Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion
Safety" is included in the List of periodical scientific
and technical publication, recommended by
Higher Attestation Commission of the Russian
Federation for publishing aspirants' works for
candidate and doctoral degree, in Abstracting
Journal and Database of VINITI RAS, EBSCO.
Information about the journal is annually
published in "Ulrich's Periodicals Directory". English
version of "Fire and Explosion Safety" articles is
included in Chemical Abstract Service (CAS).

No part of this publication may be used
or reproduced in any form or by any means
without the prior permission of the Publishers.
Reproducing any part of this material a reference
to the journal is obligatory.
Authors and advertisers account for contents
of given papers and for publishing in the open
press.
Opinion of Editorial Staff not always coincides with
Author's opinion.

Signed for printing 25.08.2023.

Date of publication 29.08.2023.

Format is 60 × 84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house

MISI – MGSU

building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
Russian Federation, 129337.

EDITOR-IN-CHIEF:

D.A. Korolchenko, Dr. Sci. (Eng.), Academician of International Academy of Ecology
and Life Safety (National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow,
Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

V.V. Molkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Ulster University, Newtownabbey, Northern
Ireland, UK)

P.A. Strizhak, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (National Research Tomsk Polytechnic
University, Tomsk, Russia)

EDITORIAL BOARD:

I.K. Bakirov, Cand. Sci. (Eng.) (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia,
Republic of Bashkortostan)

N.M. Barbin, Dr. Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Chem.), Professor, Honoured Worker of Science
and Technology of the Russian Federation (Ural Institute of State Fire Service of Emercom
of Russia, Yekaterinburg, Russia)

A.A. Berlin, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Academician of Russian Academy of Sciences
(Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

V.V. Bogdanova, Dr. Sci. (Chem.), Professor (Research Institute for Physical Chemical
Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus)

N.N. Brushlinskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural
Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation (State Fire Academy of Emercom of
Russia, Moscow, Russia)

P. Wagner, Dr. Sci. (Eng.) (Berlin Fire and Rescue Academy, Berlin, Germany)

A.V. Kalach, Dr. Sci. (Chem.), Professor (Voronezh State Technical University, Voronezh,
Russia)

S.V. Kuznetsov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (A. Ishlinsky Institute for Problems in
Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

V.N. Lozhkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Saint Petersburg University of State Fire Service of
Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russia)

I.G. Malygin, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Solomenko Institute of Transport Problems of
the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia)

Yu.Kh. Polandov, Dr. Sci. (Eng.), Professor (National Research Moscow State University of
Civil Engineering, Moscow, Russia)

S.V. Puzach, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of National Academy of
Fire Science (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

K.Zh. Raimbekov, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (Kokshetau Technical Institute, Committee
of Emergency Situations of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan,
Kokshetau, Kazakhstan)

A. Restas, Ph. D. (National University of Public Service, Institute of Disaster Management,
Budapest, Hungary)

B.B. Serkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of National Academy of Fire Science
(State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

A.G. Tamrazyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of Russian Academy of Engi-
neering, Advisor of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (National
Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)

A.A. Tarantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Solomenko Institute of Transport Problems of
the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia)

B. Hristov, Dr. Ing., Professor (University of Applied Sciences, Berlin, Germany)

A. Celani (Polytechnic University of Milan, Milan, Italy)

R.M. Ciric, Ph. D., Professor (The Higher Technical School of Professional Studies, Novi
Sad, Serbia)

Yu.N. Shebeko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of National Academy of Fire Sci-
ence (All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha,
Moscow Region, Russia)

R.C. Shouse, Ph. D. (Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, United
States)

S.E. Yakush, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of
the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 4. С. 5–14
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(4):5-14

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 05.614.849

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.04.5-14>

Имитационное моделирование и критерии решений по противопожарной защите общественных зданий

Владимир Иванович Присадков¹, Светлана Витальевна Муслакова¹✉, Александр Анатольевич Абашкин¹, Константин Владимирович Присадков²

¹ Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

² ООО «Центр проектно-сметных работ», г. Владимир, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Гибкое нормирование определяет цели проектирования системы противопожарной защиты объекта, а пути их достижения выбирает проектировщик. Выполнение поставленной задачи подтверждается проверкой критериев. Цель статьи — показать возможности использования имитационного моделирования для реализации целей гибкого нормирования систем противопожарной защиты общественных зданий.

Теоретические основы имитационного моделирования. Предлагается при имитационном моделировании учитывать индивидуальный пожарный риск и риск материальных потерь при пожаре. Для розыгрыша одного случайного сценария пожара используют утвержденную процедуру расчета индивидуального пожарного риска, входящую в основной блок. Перечень случайных входных величин, области их изменения, розыгрыш значений, обработка результатов моделирования, выбор решений по полученным результатам, управление моделированием проводится во втором блоке имитационной системы.

Результаты и их обсуждение. Применение имитационного моделирования обосновано для выбора рациональных решений по пожарной безопасности. Проектировщик, исходя из условий объекта и требований пожарной безопасности, может выбрать критерий и систему защиты объекта, решив многокритериальную задачу. Предложены модели для оценки надежности использования первичных средств пожаротушения, тушения пожарной охраной пожара в очаге, надежности противопожарных строительных конструкций, противопожарных дверей, отдельных или в составе противопожарных преград. Сформулирована система критериев, включающих критерии: индивидуального пожарного риска, приведенных затрат, «запаса времени эвакуации», необходимого времени эвакуации. На основе статистики, полученной в результате имитационного моделирования, проектировщик определяет искомые показатели. Приведена формула для расчета числа испытаний в зависимости от точности определения математического ожидания, дисперсии случайных величин статистических параметров.

Выводы. Предложено в рамках гибкого нормирования при проектировании систем противопожарной защиты использовать имитационное моделирование по методу Монте-Карло. Систематизированы критерии принятия решений, учитывающие характеристики пожарных рисков. Приведены расчетные оценки эффективности ряда противопожарных мероприятий.

Ключевые слова: гибкое нормирование; имитационная система; рациональный вариант; случайные факторы; пожарный риск

Для цитирования: Присадков В.И., Муслакова С.В., Абашкин А.А., Присадков К.В. Имитационное моделирование и критерии решений по противопожарной защите общественных зданий // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 5–14. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.5-14.

✉ Муслакова Светлана Витальевна, e-mail: msv-nika@yandex.ru

Simulation modelling and decision criteria for fire protection of public buildings

Vladimir I. Prisadkov¹, Svetlana V. Muslakova¹✉, Aleksandr A. Abashkin¹, Konstantin V. Prisadkov²

¹ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

² Design and Estimate Center, Vladimir, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Flexible rationing determines the design objectives of the fire protection system of the object, and the ways to achieve them are chosen by the designer. The fulfilment of the set task is confirmed by the verification of criteria. The purpose of the article is to show the possibilities of using simulation modelling to implement the objectives of flexible rationing of fire protection systems of public buildings.

Theoretical foundations of simulation modelling. It is proposed to take into account individual fire risk and the risk of material losses in case of fire during simulation modelling. To draw one random fire scenario, an approved procedure for calculating individual fire risk is used, which is included in the main block. The list of random input variables, the areas of their change, the drawing of values, the processing of simulation results, the choice of solutions based on the results obtained, modelling control is carried out in the second block of the simulation system.

Results and their discussion. The application of simulation modelling is justified for the choice of rational decisions on fire safety. The designer based on the conditions of the object and fire safety requirements can choose the criterion and system of object protection by solving a multi-criteria problem. Models for assessing the reliability of the use of primary fire extinguishing means, fire extinguishing by the fire brigade in the fire centre, reliability of fire protection building structures, fire doors, separate or as part of fire barriers are proposed. The system of criteria is formulated, including the following criteria: individual fire risk, reduced costs, "evacuation time reserve", necessary evacuation time.

On the basis of statistics obtained as a result of simulation modelling, the designer determines the required indicators. The formula for calculating the number of tests depending on the accuracy of determining the mathematical expectation, dispersion of random values of statistical parameters is given.

Conclusions. It is proposed to use Monte Carlo simulation modelling in the framework of flexible rationing when designing fire protection systems. Decision-making criteria that take into account the characteristics of fire risks are systematized. Calculated estimates of the effectiveness of a number of fire-fighting measures are given.

Keywords: flexible rationing; simulation system; rational variant; random factors; fire risk

For citation: Prasadkov V.I., Muslakova S.V., Abashkin A.A., Prasadkov K.V. Simulation modelling and decision criteria for fire protection of public buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4): 5-14. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.5-14 (rus).

✉ Svetlana Vitalievna Muslakova, e-mail: msv-nika@yandex.ru

Введение

В последние десятилетия во всем мире происходит внедрение гибкого нормирования в практику проектирования систем противопожарной защиты общественных зданий. Суть гибкого нормирования состоит в том, что устанавливаются цели, которые должны быть достигнуты на объекте с помощью системы противопожарной защиты, а пути достижения установленных целей выбирает проектировщик. В западноевропейской и американской научно-технической литературе такой способ проектирования называется «performens based design», иногда переводимый на русский язык как объектно-ориентированный подход. Основой гибкого нормирования являются критерии (целевые установки) и их расчетные оценки.

В области проектирования систем противопожарной защиты общественных зданий актуальным является вопрос вариантного проектирования — разработки инструментария для выбора наилучшей, в определенном смысле, системы противопожарной защиты (СПЗ) здания.

Ниже изложены подходы, элементы гибкого нормирования, позволяющие найти и обосновать оптимальные решения в рамках постановки задачи обеспечения пожарной безопасности. Систематизированы критерии, отражающие социальные и экономические аспекты создания СПЗ объекта; разработаны модели по оценке эффективности (надежности) ряда элементов СПЗ зданий. Эффективным матема-

тическим обеспечением гибкого нормирования является имитационное моделирование.

В настоящее время в России пожарные риски оцениваются для общественных зданий, по сути, детерминировано. Стохастичность риска учитывается только через вероятность возникновения пожара в соответствии с Федеральным законом «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»¹ (далее — ФЗ-123).

В связи с развитием вычислительных возможностей для широкого круга исследователей, совершенствованием постановок задач в пожарной науке, включая введение новых критериев с учетом возможности их оценок, происходит внедрение имитационного моделирования для решения задач гибкого нормирования [1].

При этом осуществляется переход от детерминированных представлений к вероятностному описанию процессов, исходных данных и полученных результатов.

Цель настоящей статьи — показать возможности использования имитационного моделирования для реализации целей гибкого нормирования систем противопожарной защиты общественных зданий; разработать модели для оценки надежности ряда противопожарных мероприятий; систематизировать критерии для решения, как правило, многоцелевой

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

задачи выбора рационального варианта противопожарной защиты объектов; определить возможности повышения качества проектирования с использованием гибкого нормирования за счет учета стохастической природы развития пожара и эффективности противопожарных мероприятий на основе статистических испытаний (метод Монте-Карло).

Процесс статиспытаний обеспечивает средства для получения вероятностных распределений искомых параметров, что позволяет оценить точность полученных результатов. Выбор оптимального варианта СПЗ проводится с учетом значений заданных критериев оптимизации.

Теоретические основы имитационного моделирования

Суть использования метода Монте-Карло, как основы имитационного моделирования [1], заключается в следующем. В основу расчетов положены детерминированные модели, используемые для оценки эффективности (надежности) отдельных противопожарных мероприятий. Все случайные входные данные согласно априорно заданных законов распределения генерируются. Полученные входные данные подставляются в соответствующую детерминированную модель для получения одного результата статиспытания. Затем процесс повторяется; проводится всего n статиспытаний. Результаты испытаний («искусственная» статистика) обрабатываются с целью определения характеристик искомых величин (одного выходного параметра).

Вопрос заключается в количестве n необходимых реализаций (статиспытаний) модели для определения математического ожидания выходных параметров с заданной точностью [1]. Ниже приведены формулы для оценки необходимого числа испытаний на основе «искусственных» статистик.

Полученные оценки надежности противопожарных мероприятий используются для моделирования пожара в здании и расчета критериев. С учетом полученных значений критерия выбирается оптимальный вариант СПЗ здания.

Модели оценки пожарных рисков

Пожарные риски включают, как правило, вопросы безопасности людей и сохранения материальных ценностей при пожарах^{2, 3, 4} [2].

² National Fire Protection Association. Life Safety Code. NFPA 101, Edition, National Fire Protection Association, Quincy. MA. 2021.

³ British Standards Institution (Ed.) Fire Safety in the Design, Management and Use of Buildings, BSI, London, 2017, Code of practice, BS 9999.

⁴ British Standards Institution (Ed.). Application of Fire Safety Engineers Principles to the Design of Buildings. Part-6: Human Factors: Life Safety Strategies – Occupant Evacuation, Behaviour and Condition (Sub-system 6). PD 7974-6, BSI, London, 2019.

Вероятностная оценка риска позволяет отразить изменчивость риска и неопределенности при моделировании риска, а именно:

- неопределенность входных параметров задачи (скорость распространения пожара, время начала эвакуации, разбросы в скоростях движения людей, стоимость материальных ценностей, коэффициентов ущерба);
- приближенность исходной детерминированной модели к реальной картине события;
- неопределенности, связанные с действиями человека при пожаре, например ошибки при выборе пути эвакуации, физические ограничения возможностей человека и т.д.

При решении вопросов по оценке пожарных рисков в части безопасности людей независимо от формы расчетов исходят из сравнения допустимого времени эвакуации (времени блокирования опасными факторами пожара путей эвакуации) $T_{нб}$ и времени эвакуации $T_{э}$, включая время начала эвакуации $T_{нэ}$.

Аналогичные времена в зарубежной литературе [3] имеют названия: доступное время эвакуации (available safe egress time) t_{ASET} и требуемое время эвакуации (required safe egress time) t_{RSET} .

Имитационное моделирование основано на апробированных детерминированных моделях, включенных в основной блок имитатора. Для каждого отдельного испытания разыгрывается набор входных параметров. Этот набор данных может изменяться в зависимости от помещения объекта и от времени пожара. Розыгрыш исходных данных, обработка результатов, управление имитатором включено во вспомогательные блоки имитатора [4].

В России используются различные модели, описывающие динамику пожаров в помещениях и зданиях [5]. Известны также зарубежные модели для описания развития пожара в здании [6–8].

Модели динамики людских потоков при эвакуации из зданий подробно описаны в работах В.В. Холщевникова и Д.А. Самошина [9, 10]. Указанные модели позволяют оценить, в том числе, индивидуальные пожарные риски с учетом требований ФЗ-123 и Методики определения расчетных величин пожарного риска⁵ (далее — Методика).

Один из недостатков такого подхода заключается в том, что не учитываются возможности развития пожара из помещений по всем направлениям. Например, принимаются в расчет только открытые

⁵ Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : утв. приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382 (с Изменениями, внесенными приказами МЧС России № 749 от 12.12.2011 и № 632 от 02.12.2015).

проемы без учета надежности средств защиты проемов в них.

В конце прошлого столетия во ВНИИПО МВД СССР успешно развивалось направление динамического вероятностного моделирования пожаров на графах, по сути моделирование на полумарковских сетях [11, 12].

Моделирование на графах позволяло исключить указанный выше недостаток.

Выделялись с присвоением номеров помещения здания. Далее устанавливались возможные направления и вероятности развития пожаров из указанных помещений по возможным направлениям, определялось время до перехода пожара в смежное помещение. В результате определялась динамическая картина развития пожара: для любого временного промежутка устанавливались помещения, охваченные пожаром.

Модели на стохастических графах позволяют детализировать направления, вероятностные и временные характеристики динамики пожаров в здании; предназначены в первую очередь для прогнозирования материальных потерь от пожара с учетом ряда элементов систем противопожарной защиты объекта.

Ряд практически важных случаев можно рассмотреть с помощью аналитических моделей, разработанных во ВНИИПО МВД СССР [11, 13].

В качестве примера возьмем здание, разделенное противопожарными преградами на пожарные отсеки (секции) так, что каждый отсек граничит не более чем с двумя отсеками. Отсеки в здании примем одинаковыми по параметрам. Определим ниже прогнозный ущерб от пожаров в здании с учетом защиты помещений здания автоматической установкой пожаротушения (АУП).

Без деления здания на пожарные отсеки материальный ущерб при пожаре составит (приближенно), руб/год:

$$K_1 = \lambda S(1 - P_A)YSR, \quad (1)$$

где λ — вероятность возникновения пожара в здании, год⁻¹·м⁻²;

S — площадь здания, м²;

P_A — надежность тушения пожара АУП;

Y — стоимость материальных ценностей в здании, включая конструкции здания, руб·м⁻²;

R — коэффициент ущерба при пожаре.

При делении здания на два одинаковых пожарных отсека материальный ущерб приближенно равен, руб/год:

$$K_2 = \frac{\lambda S(1 - P_A)YSR(1 + q)}{2}, \quad (2)$$

где q — ненадежность противопожарной стены.

При делении здания на три одинаковых пожарных отсека ожидаемый ущерб при пожаре составит:

$$K_3 = \frac{\lambda S(1 - P_A)YSR}{9}(3 + 4q + q^2) \quad (3)$$

и так далее.

Аналитические модели типа (1), (2) и (3) удобны для использования в имитационном моделировании, в основном блоке. При этом достаточно знать законы распределения входных параметров. В данном случае случайными параметрами являются λ , Y , q . Далее необходимо разыграть входные параметры с помощью генератора случайных чисел, подставить их в аналитическую модель, получить результаты статиспытания.

Результаты отдельных испытаний составляют статистику, которая обрабатывается определенным способом для получения характеристик искомого параметра с заданной точностью за счет подбора числа испытаний.

Результаты и их обсуждение

Модели оценки эффективности элементов систем пожарной безопасности

Исходные данные по эффективности противопожарных мероприятий определяются из данных статистики, расчетным путем или принимаются экспертно. Мы не будем утверждать, что экспертный подход — это не совсем хорошо; когда данные отсутствуют, на практике такой подход является единственно возможным.

Первичные средства пожаротушения

Принимается, что пожар тушится в очаге первичным средством пожаротушения (огнетушителем, противопожарным водопроводом) обученным персоналом. Вероятность успеха тушения определяется по следующей формуле [14]:

$$P_{п.с} = K_{10} \text{Вер} (S_{п.с} > S_{ф}), \quad (4)$$

где K_{10} — экспертный коэффициент успеха тушения, отражающий факторы, не учтенные в модели, например неплоскостное развитие пожара, вероятность отказа первичных средств пожаротушения;

$S_{п.с}$ — площадь пожара, которая может быть потушена первичным средством пожаротушения, м²;

$S_{ф}$ — площадь горения в очаге пожара на момент подачи первичных средств пожаротушения, м².

Для случая нормального распределения входных факторов формула (4) может быть записана в квадратурах и вероятность успеха тушения первичными средствами определяется по таблице 7 [14].

Успех тушения пожара пожарной охраной

Ниже вероятность успеха тушения пожара в помещении очага пожарной охраной предлагается оценивать для первого прибывшего подразделения по формуле [15]:

$$P_{\text{по}} = K_{20} \text{Вер}(S_{\text{т}} > S_{\text{ф}}), \quad (5)$$

где $S_{\text{т}}$ — площадь тушения пожара, которая может быть потушена первым прибывшим подразделением, м²;

$S_{\text{ф}}$ — фактическая площадь пожара на момент подачи первых стволов, м².

Формула (5) позволяет учитывать время прибытия, время развертывания и подачи стволов, а также данные по скоростям распространения горения при пожаре.

Коэффициент K_{20} определяется экспертно. При отсутствии данных он принимается равным 1.

Эффективность строительных конструкций

Строительные конструкции выполняют задачу при пожаре [16, 17], если:

$$t_{\text{ог}} > t_{\text{эк}},$$

где $t_{\text{ог}}$ — предел огнестойкости строительной конструкции, мин;

$t_{\text{эк}}$ — эквивалентная продолжительность пожара, мин [5].

Надежность строительной конструкции равна вероятности:

$$P_{\text{с.к}} = \text{Вер}(t_{\text{ог}} > t_{\text{эк}}), \quad (6)$$

где $t_{\text{ог}}, t_{\text{эк}}$ — случайные величины [19].

В качестве строительной конструкции в формуле (6) рассматриваются противопожарные стены, противопожарные перегородки, противопожарные перекрытия и т.д.

Надежность противопожарных дверей

Вероятность выполнения задачи противопожарной дверью при пожаре определим как:

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{пол}} P_{\text{пр}} P_{\text{зам}}, \quad (7)$$

где надежность двери при пожаре по полотну двери:

$$P_{\text{пол}} = \text{Вер}(t_{\text{ог.м}} > t_{\text{эк.п}}); \quad (8)$$

$P_{\text{пр}}$ — надежность противопожарной двери в узле притвора, определяемая по данным огневых испытаний;

$P_{\text{зам}}$ — надежность устройства закрытия противопожарных дверей при пожаре, определяемая по результатам обследования зданий после пожара или экспертно;

$t_{\text{ог.м}}$ — предел огнестойкости конструкции полотна двери, мин;

$t_{\text{эк.п}}$ — эквивалентная продолжительность пожара, рассчитанная по полотну двери, мин.

Надежность противопожарных стен, перегородок с противопожарными дверями, клапанами

Запишем надежность противопожарных преград, оборудованных инженерными средствами как:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{с.к}} P_{\text{дв}} P_{\text{кл}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{кл}}$ — надежность клапана, установленного на воздуховоде в месте пересечения воздуховодом противопожарной преграды, устанавливается на основе данных огневых испытаний или экспертно.

Критерии выбора проектных решений по противопожарной защите общественных зданий

Современные критерии в части проектирования противопожарной защиты зданий условно можно разделить на две группы:

- глобальные критерии;
- локальные критерии.

Необходимо отметить, что здесь речь идет о размерных критериях, а не о широко известных безразмерных критериях типа критериев Фруда, Рейнольдса, Нуссельта и т.д.

К глобальным критериям относится, например, критерий индивидуального пожарного риска. Установлено предельное значение критерия: например, для общественных зданий 10^{-6} воздействий опасных факторов пожара (ОФП) на одного человека в год. Согласно ФЗ-123¹, система противопожарной защиты объекта должна обеспечить значение индивидуального риска в общественных зданиях, не превышающее нормативной величины.

В области материальных потерь известен критерий приведенных затрат, равный сумме приведенных затрат на систему пожарной безопасности объекта и материальных потерь от пожаров в здании в течение года [18].

В России известны и другие критерии, например относительный уровень ожидаемых материальных потерь на объекте от пожара [19]. Уровень потерь не должен превышать средний уровень потерь по аналогичным объектам.

Локальные критерии используются достаточно часто в пожарном деле. Например, при выборе пределов огнестойкости противопожарной преграды величина $t_{\text{ог}} - t_{\text{эк}}$ является локальным критерием с критическим значением, равным 0. Для выполнения задачи предотвращения распространения ОФП через преграду критерий должен быть больше 0.

Новые критерии по безопасности людей, численные значения которых в вероятностной постановке рассчитываются с помощью имитационного моделирования, представлены ниже.

Время эвакуации

В России принято записывать время эвакуации как:

$$t_{\text{э}} = t_{\text{р}} + t_{\text{н.э}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{р}}$ — расчетное время эвакуации, мин;

$t_{\text{н.э}}$ — время начала эвакуации, отсчитываемое от времени возникновения пожара, мин.

Предлагается детализировать время начала эвакуации с учетом [1, 9, 10]:

$$t_{\text{н.э}} = t_{\text{об}} + t_{\text{оп}} + t_{\text{реак}}, \quad (11)$$

где $t_{\text{об}}$ — время обнаружения пожара, отсчитываемое от начала пожара, мин;

$t_{\text{оп}}$ — время оповещения о пожаре, мин;

$t_{\text{реак}}$ — время реагирования людей от момента оповещения до начала движения, мин.

Все величины в формуле (11) рассматриваются как случайные. Время эвакуации является суммой четырех случайных величин, что позволяет считать величину $t_{\text{э}}$ распределенной по нормальному закону.

Необходимое время эвакуации

Необходимое время эвакуации для зальных помещений нормируется п. 7.3.4 СП 1.13130.202⁶. В зарубежной литературе необходимое время эвакуации для однородных потоков эвакуирующихся (без маломобильных групп населения) обозначается как t_{ASET} [19, 20].

После введения требований по необходимому времени эвакуации время эвакуации становится критерием.

В нормативных документах в качестве необходимого времени эвакуации используется величина:

$$t_{\text{нб}} = 0,8t_{\text{бл}},$$

где $t_{\text{бл}}$ — время блокирования путей эвакуации ОФП, а коэффициент 0,8 учитывает случайный характер процесса и возможные разбросы величин.

Критерий «запас времени при эвакуации»

Разность величин $t_{\text{нб}} - t_{\text{бл}}$ можно рассматривать как критерий с учетом статьи 53 ФЗ-123¹. Для успеха эвакуации в рассматриваемых точках здания согласно сценарию пожара критерий должен быть положительным.

⁶ СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы.

В зарубежной литературе широко используется аналогичный критерий $t_{\text{ASET}} - t_{\text{RSET}}$, где t_{ASET} — время блокирования путей эвакуации; t_{RSET} — время выхода людей из здания наружу для рассматриваемой точки в здании [19]. Предложено графическое представление критерия запаса времени $t_{\text{ASET}} - t_{\text{RSET}}$, которое позволяет установить узкие места в проектах по обеспечению безопасности людей при пожарах [19, 21].

Актуальный вопрос: какие значения должны быть поставлены в выражения критериев при гибком нормировании систем противопожарной защиты?

Влияние количества испытаний на точность расчетов

Имитационное моделирование с целью получения искомого параметра дает некоторое распределение полученных значений. При проектировании системы противопожарной защиты необходимо знать значение параметра и точность его определения. Для определенности в качестве искомого параметра рассмотрим время эвакуации $t_{\text{э}}$. Методом статистических испытаний получим статистику значений $t_{\text{э}1}, t_{\text{э}2}, \dots, t_{\text{э}n}$ для конкретного сценария пожара. Среднее значение статистики: $\bar{t}_{\text{э}}$ и дисперсии $\sigma_{\text{э}n}^2$. Введем среднее значение всех имитаций времени эвакуации $\bar{t}_{\text{э.м}}$ и дисперсию $\sigma_{\text{э.м}}^2$. В случае больших n центральная предельная теорема позволяет утверждать, что:

$$\bar{t}_{\text{э.м}} = \bar{t}_{\text{э}} \text{ и } \sigma_{\text{э.м}}^2 = \frac{\sigma_{\text{э}n}^2}{n}. \quad (12)$$

Доверительный интервал $100(1 - \alpha) \%$ для среднего значения $\bar{t}_{\text{э}}$ распределения $t_{\text{э}}$ дается приближенной формулой [1]:

$$\text{Вер} \left(-Z_{\alpha/2} < \frac{\bar{t}_{\text{э.м}} - \bar{t}_{\text{э}}}{\sigma_{\text{э}} / \sqrt{n}} < Z_{\alpha/2} \right) \approx 1 - \alpha. \quad (13)$$

Доверительные коэффициенты $Z_{\alpha/2}$ берутся из таблиц как функция уровня доверительности α [1].

Если $t_{\text{э}i}$ распределены по нормальному закону независимо от величины выборки n , то $\bar{t}_{\text{э}i}$ также имеет нормальное распределение.

Используя среднее значение выборки

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{э}i}}{n} \quad (14)$$

и стандартное отклонение

$$\sigma_s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{t}_{\text{э}i} - S)^2 \frac{1}{n-1}}, \quad (15)$$

получим доверительный интервал [1]:

$$S - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}} < \bar{t}_3 < S + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}}. \quad (16)$$

Формула (16) при заданном уровне доверительности α позволяет установить доверительный интервал для искомого параметра числа испытаний n . При этом могут быть особенности, определяемые физическим смыслом параметра.

Например, если речь идет о необходимом времени эвакуации, то целесообразно принять за искомую величину первый квартиль распределения $t_{нб}$.

При рассмотрении времени эвакуации следует брать третий квартиль распределения t_3 .

Точность определения искомого параметра возрастает по мере увеличения числа испытаний n . Достоинства формулы (16) определяются независимостью от вида распределения параметра, получаемого на основе статиспытаний. В работе [1] приведены ссылки и формулы для определения доверительных интервалов при малом числе статиспытаний.

Распределение искоемых величин, которые определяются на основе метода статиспытаний, позволяет оценить успех эвакуации людей при пожаре по формуле:

$$P_{3.6} = \text{Вер}(t_3 < t_{нб}). \quad (17)$$

В случае аппроксимации нормальными законами распределений входных параметров t_3 и $t_{нб}$ вероятность эвакуации может быть записана через интеграл Гаусса Φ [22]:

$$P_{3.6} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{2} + \Phi(\gamma), \quad (18)$$

где

$$\gamma = \frac{\bar{t}_{нб} - \bar{t}_3}{\sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_{нб}^2}}, \quad (19)$$

где $\bar{t}_{нб}$ — математическое ожидание необходимого времени эвакуации.

Таким образом, показаны возможности и целесообразность статистического моделирования для реализации гибкого нормирования систем противопожарной защиты общественных зданий. Предложено ряд входных факторов (исходных данных) в имитационной модели рассматривать случайными, включая характеристики параметров, определяющих динамику опасных факторов пожара, процессов эвакуации, материального ущерба при пожаре.

Выводы

1. Для повышения эффективности гибкого нормирования СПЗ общественных зданий предложено последовательно использовать стохастический подход, включающий вероятностные характеристики исходных данных, имитационное моделирование методом Монте-Карло и специальную обработку полученных результатов.

2. Систематизирована система критериев решения многофункциональной задачи выбора рационального варианта противопожарной защиты объектов. Искомые параметрами могут быть: величина материального ущерба при пожаре, вероятности возникновения ущерба определенного размера, необходимое время эвакуации, время эвакуации, «запас времени эвакуации», успех эвакуации.

3. Приведены формулы для оценки необходимого числа испытаний, математического ожидания расчетных величин на основе «искусственных» статистик, результатов имитационного моделирования.

Предложено в качестве основных значений искоемых параметров принимать их средние значения (математические ожидания), определяемые по результатам статиспытаний с указанием доверительных интервалов.

4. Для зданий с особой ответственностью в части пожарного риска предлагается принимать значения параметров, соответствующих первому или третьему квартилям распределений с учетом физического смысла искоемых параметров.

5. Сформулированы модели для оценки надежности ряда противопожарных мероприятий. Предложена и подтверждена возможность учета при имитационном моделировании надежности выполнения задачи следующими элементами СПЗ объекта:

- первичные средства пожаротушения;
- тушения пожара в помещении очага пожарной охраной;
- предотвращение распространения пожара через ограждения помещения с проемами, защищенными противопожарными дверями и/или огнезадерживающими клапанами, установленными на воздуховодах;
- тушение пожара АУП.

6. Основной недостаток имитационных моделей — их громоздкость и трудоемкость расчетов — преодолевается по мере развития средств вычислительной техники и навыков пользователей, а главное — окупается возможностями метода и ценностью получаемых результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tinaburri A. Principles for Monte Carlo agent-based evacuation simulations including occupants who need assistance. From RSET to RISET // *Fire Safety Journal*. 2022. Vol. 127. P. 103510. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103510
2. Присадков В.И., Муслакова С.В., Костерин И.В., Фадеев В.Е., Шамаев А.М. Инженерный метод выбора рационального варианта противопожарной защиты объектов с экономической ответственностью // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. № 8. С. 49–57. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.49-57
3. Poon S. A dynamic approach to ASET/RSET assessment in performance based design // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 71. Pp. 173–181. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.025
4. Вентцель Е.С. Исследование операций. М. : Советское радио, 1972. 407 с.
5. Молчадский И.С. Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.
6. Peacock R.D., Hoskins B.I. A review of building evacuation models. National Institute of Standards and Technology, 2010. Technical Note 1680.
7. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. Fire dynamics simulator. Technical Reference Guide. Vol. 3: Validation. National Institute of Standards and Technology, 2015.
8. Heskestad G. Fire plumes, flame height, and air entrainment // *Handbook of Protection Engineering*. 3rd ed. Chapter 1. Springer, New York, 2016. Pp. 2–1, 2–17. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_13
9. Холщевников В.В., Самошин Д.А. Эвакуация и поведение людей при пожарах. М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. 212 с.
10. Холщевников В.В. Гносеология людских потоков : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 592 с.
11. Присадков В.И. Разработка методов выбора рациональных вариантов систем противопожарной защиты промышленных зданий : дис. д-ра техн. наук. М. : ВНИИПО, 1990. 540 с.
12. Исачков А.В., Присадков В.И. Модель распространения пожара по зданию на основе вероятностных сетей // *Безопасность людей при пожарах в зданиях и сооружениях : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1987. С. 69–77.*
13. Присадков В.И., Исачков А.В., Лицкевич В.В., Дударев Г.И. Имитатор пожара в здании и выбора экономически целесообразного варианта противопожарной защиты // *Проблемы пожарной безопасности объектов и административно-территориальный единиц : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1988. С. 24–30.*
14. Присадков В.И., Муслакова С.В., Хатунцева С.Ю., Костерин И.В., Фадеев В.Е., Шамаев А.М. Расчетные оценки эффективности тушения пожара в очаге внутренним противопожарным водопроводом // *Пожарная безопасность*. 2017. № 1. С. 49–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28844561>
15. Терещенков В.В. Справочник руководителя тушения пожара. Технические возможности пожарных подразделений. М. : Пожжкнига, 2004. 256 с.
16. Костерин И.В., Муслакова С.В., Присадков В.И., Фадеев В.Е. Коэффициенты безопасности и надежность строительных конструкций при пожаре // *Материалы XXIX междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России. М., 2017. С. 295–296.*
17. Присадков В.И., Молчадский И.С., Лицкевич В.В., Гудков А.А. Вероятностный метод расчета надежности конструкций при пожаре // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1990. № 1. С. 22–25.
18. Аболенцев Ю.И. Экономика противопожарной защиты. М. : ВПИТША МВД СССР, 1985. 216 с.
19. Schröder B., Arnold L., Seyfried A. A map representation of the ASET-RSET concept // *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 115. P. 103154. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103154
20. Ronchi E. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering // *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 120. P. 103020. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103020
21. Grandison A. Determining confidence intervals, and convergence, for parameters in stochastic evacuation models // *Fire Technology*. 2020. Vol. 56. Pp. 2137–2177. DOI: 10.1007/s10694-020-00968-0
22. Ржаницын А.П. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. 239 с.

REFERENCES

1. Tinaburri A. Principles for Monte Carlo agent-based evacuation simulations including occupants who need assistance. From RSET to RISET. *Fire Safety Journal*. 2022; 127:103510. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103510
2. Prisdakov V.I., Muslakova S.V., Kosterin I.V., Fadeev V.E., Shamaev F.M. Engineering method of selection of rational variant of fire protection of objects with economic responsibility. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 8:49-57. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.49-57 (rus).
3. Poon S. A dynamic approach to ASET/RSET assessment in performance based design. *Procedia Engineering*. 2014; 71:173-181. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.025
4. Ventsel E.S. *Research of operations*. Moscow, Soviet Radio Publ., 1972; 407. (rus).
5. Molchadskiy I.S. *Fire in the room*. Moscow, VNIPO, 2005; 456. (rus).

6. Peacock R.D., Hoskins B.I. *A review of building evacuation models*. National Institute of Standards and Technology, 2010. Technical Note 1680.
7. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. *Fire dynamics simulator*. Technical Reference Guide. Vol. 3: Validation. National Institute of Standards and Technology, 2015.
8. Heskestad G. Fire plumes, flame height, and air entrainment. *Handbook of Protection Engineering*. 3rd ed. Chapter 1. Springer, New York, 2016; 2-1, 2-17. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_13
9. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A. *Evacuation and behavior of people in case of fires*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2009; 212. (rus).
10. Kholshchevnikov V.V. *Epistemology of human flows : monograph*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019; 592. (rus).
11. Prisdakov V.I. *Development of methods for selecting rational options for fire protection systems of industrial buildings : dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Moscow, VNIPO, 1990; 540. (rus).
12. Isachkov A.V., Prisdakov V.I. A model of fire propagation through a building based on probabilistic networks. *Safety of people during fires in buildings and structures : collection of scientific papers*. Moscow, VNIPO, 1987; 69-77. (rus).
13. Prisdakov V.I., Isachkov A.V., Litskevich V.V., Dudarev G.I. A fire simulator in a building and the choice of an economically feasible fire protection option. *Problems of fire safety of objects and administrative-territorial units : a collection of scientific papers*. Moscow, VNIPO, 1988; 24-30. (rus).
14. Prisdakov V.I., Maslakova S.V., Khatuntseva S.Yu., Kosterin I.V., Fadeev V.E., Shamaeva A.M. Design assessment of the efficiency of fire fighting in the seat by the in-building fire. *Pozharnaya Bezopasnost' / Fire Safety*. 2017; 1: 49-54. (rus).
15. Terebnev V.V. *Handbook of the fire extinguishing manager. Technical capabilities of fire departments*. Moscow, Pozhkniga Publ., 2004; 256. (rus).
16. Kosterin I.V., Muslakova S.V., Prisdakov V.I., Fadeev V.E. Safety coefficients and reliability of building structures in case of fire. *Materials of the XXIX International scientific and practical conference dedicated to the 80th anniversary of the FSBI VNIPO EMERCOM of Russia*. Moscow, 2017; 295-296. (rus).
17. Prisdakov V.I., Molchadsky I.S., Litskevich V.V., Gudkov A.A. Probabilistic method for calculating the reliability of structures in case of fire. *Construction mechanics and calculation of structures*. 1990; 1:22-25. (rus).
18. Abolentsev Yu.I. *Economics of fire protection*. Moscow, VIPTSH of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1985; 216. (rus).
19. Schröder B., Arnold L., Seyfried A. A map representation of the ASET-RSET concept. *Fire Safety Journal*. 2020; 115:103154. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103154
20. Ronchi E. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*. 2021; 120:103020. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103020
21. Grandison A. Determining confidence intervals, and convergence, for parameters in stochastic evacuation models. *Fire Technology*. 2020; 56:2137-2177. DOI: 10.1007/s10694-020-00968-0
22. Rzhantsyn A.R. *Theory of calculation of building structures for reliability*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978; 239. (rus).

Поступила 15.05.2023, после доработки 29.05.2023;

принята к публикации 06.06.2023

Received May 15, 2023; Received in revised form May 29, 2023;

Accepted June 6, 2023

Информация об авторах

ПРИСАДКОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Балашиха, Московская обл., Российская Федерация; РИНЦ ID: 760543; ORCID: 0000-0002-2161-0794; e-mail: vniipo@mail.ru

МУСЛАКОВА Светлана Витальевна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации

Information about the authors

Vladimir I. PRISADKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Main Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760543; ORCID: 0000-0002-2161-0794; e-mail: vniipo@mail.ru

Svetlana V. MUSLAKOVA, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Department of Fire Modeling and Non-Standard Design, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO,

по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Балашиха, Московская обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6146-8059; e-mail: msv-nika@yandex.ru

АБАШКИН Александр Анатольевич, начальник отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Балашиха, Московская обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: vniipo@mail.ru

ПРИСАДКОВ Константин Владимирович, главный инженер, ООО «Центр проектно-сметных работ», Россия, 600000, г. Владимир, ул. Большая Московская, 61; ORCID: 0000-0002-8307-3257; e-mail: k300572@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6146-8059; e-mail: msv-nika@yandex.ru

Aleksandr A. ABASHKIN, Head of Department of Fire Modeling and Non-Standard Design, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: vniipo@mail.ru

Konstantin V. PRISADKOV, Chief Engineer, Design and Estimate Center, Bolshaya Moskovskaya St., 61, Vladimir, 600000, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8307-3257; e-mail: k300572@yandex.ru

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare that there is no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 4. С. 15–30
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(4):15-30

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 621.1 (614.83;536.46)

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.04.15-30>

Задача о гистерезисе в работе предохранительного клапана прямого действия

Юрий Христофорович Поландов ✉

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Значительная часть предохранительных клапанов прямого действия открывается при заданном давлении, а закрывается при меньшем, образуя петлю гистерезиса. Этот эффект известен по результатам испытаний давно. Причина возникновения гистерезиса объяснена путем сравнения газодинамических сил, действующих на подвижные части клапана, и усилия пружины или груза. К сожалению, сравнение выполнено графоаналитическим методом, не обладающим общностью суждений. Это можно было бы преодолеть, описав петлю гистерезиса аналитически, но известные математические модели, в том числе и численные, описывают только отдельные ее ветви, то ли это участок петли в момент открытия клапана, то ли закрытия.

Цель исследования. Аналитическим путем решить задачу построения петли гистерезиса в работе предохранительного клапана прямого действия.

Рабочая гипотеза. Резкое движение грибка клапана вверх с седла до упора в ограничители при достижении в защищаемом объеме расчетного давления и резкое движение грибка вниз на седло при снижении давления есть результат перескока грибка с одного устойчивого положения на другое, минуя неустойчивый участок характеристики клапана.

Метод исследования. Теоретический, с использованием законов газовой динамики, механики, теории устойчивости и теории подобия.

Выводы. Петля гистерезиса в работе предохранительного клапана, представляющая собой разрывную функцию, может быть описана аналитически. Она является набором устойчивых участков линии равновесия сил, действующих на подвижные части предохранительного клапана. Полученная из условия равновесия сил зависимость высоты подъема клапана от давления в защищаемом объеме вполне адекватно отражает известные экспериментальные данные.

Получено также, что грузовые клапаны органически имеют большую петлю гистерезиса, которую никакими способами нельзя исключить. У пружинных клапанов тоже бывает петля гистерезиса, размер которой можно регулировать за счет изменения жесткости пружины, в том числе полностью исключить.

Ключевые слова: петля гистерезиса; условие равновесия сил; устойчивость состояния; статическая характеристика; жесткость пружины

Для цитирования: Поландов Ю.Х. Задача о гистерезисе в работе предохранительного клапана прямого действия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 15–30. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.15-30

✉ Поландов Юрий Христофорович, e-mail: polandov@yandex.ru

Problem of hysteresis in the operation of direct-action safety valve

Yurii Kh. Polandov ✉

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A large proportion of direct-action safety valves open at given pressure, and close at lower pressure, forming a hysteresis loop. This effect is known from the test results for a long time. The reason for the occurrence of hysteresis is explained by comparing the gas dynamic forces acting on the moving parts of the valve and the force of the spring or load. Unfortunately, the comparison is made by a graph-analytic method that lacks general judgment. This could be overcome by describing the hysteresis loop analytically, but known mathematical models, including numerical ones, describe only its separate branches, whether it is the section of the loop at the moment of valve opening or closing.

Purpose of the research. To solve analytically the problem of constructing the hysteresis loop in the operation of direct-action safety valve.

Working hypothesis. Sharp movement of the valve head upwards from the seat to the stop in the limiter when the calculated pressure is reached in the protected volume and sharp movement of the head downwards to the seat when the pressure is reduced is the result of the head jumping from one stable position to another, bypassing the unstable part of the valve characteristic.

Method of the research. Theoretical, with the use of laws of gas dynamics, mechanics, stability theory and similarity theory.

Conclusions. The hysteresis loop in the operation of the safety valve, which represents the discontinuous function, can be described analytically. It is a set of stable sections of the equilibrium line of forces acting on the moving parts of the safety valve. Obtained from the condition of equilibrium of forces, the dependence of the valve lift height on the pressure in the protected volume quite adequately reflects the known experimental data.

It is also obtained that load valves organically have a large hysteresis loop, which by any means cannot be excluded. Spring valves also have a hysteresis loop, the size of which can be adjusted by changing the spring stiffness, including complete exclusion.

Keywords: hysteresis loop; force equilibrium condition; stability of state; static characteristics; spring stiffness

For citation: Polandov Yu.Kh. Problem of hysteresis in the operation of direct-action safety valve. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4):15-30. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.15-30 (rus).

✉ Yurii Khristoforovich Polandov, e-mail: polandov@yandex.ru

Введение. Краткий обзор публикаций

Предохранительные клапаны — в англоязычной литературе Relief Valves и Safety Valves — (в дальнейшем просто «клапан» или ПК) со времен создания первого парового котла [1] являются проверенным и надежным устройством защиты объемов от опасного нарастания давления. Ввиду особой ответственности, возложенной на эти устройства, требования к ним давно нормированы. В настоящее время ПК выпускаются в качестве отдельных изделий многочисленными, как правило, специализированными организациями как отечественными, например Пензенским заводом арматуростроения¹, так и иностранными, например американской фирмой «Emerson»².

Изготовители ПК и практикующие специалисты, характеризуя это устройство, указывают, прежде всего, на: давление его срабатывания, т.е. открытия, и на пропускную способность. Это, конечно, важнейшие данные об устройстве, но у значительной части ПК есть еще одна особенность, именуемая гистерезисом (в англоязычной литературе Hysteresis), которой характерно то, что клапан открывается при заданном давлении, но закрывается при давлении, меньшем, чем при открытии. Разница между этими значениями давления сказывается в одних случаях на качестве регулирования давления, а в других — на энергопотерях, в связи с чем нормативные документы ограничивают размер гистерезиса, в частности, российские³ ограничивают 20 % от рабочего давления в защищаемом объеме. На рис. 1 приведена типичная петля гистерезиса для группы клапанов Emerson в безразмерных координатах $\beta = \beta(\delta)$, $\beta = 100F/F_0$,

где F — текущее значение площади проходного сечения клапана, F_0 — площадь полного открытия клапана, а $\delta = 100(p_k - p_{k0})/p_{k0}$, где p_k — текущее давление в котле, p_{k0} — заданное давление открытия клапана. По тому, как подан материал сайта, можно заключить, что приведенная зависимость является общей для всей группы рекламируемых ПК. Попутно заметим, что клапаны этой фирмы имеют петлю гистерезиса на уровне 10 %.

Надо отметить, что, несмотря на относительную простоту устройства ПК, процессы, протекающие в них, особенно газодинамические, до сих пор не удавалось достаточно убедительно описать.

Среди научных публикаций, относящихся к исследованиям ПК, выделим прежде всего книгу мatriарха Т.Ф. Кондратьевой [2], приоритет которой в масштабах и убедительности результатов исследований неоспорим, и потому редкая русскоязычная статья, посвященная этой тематике, обходится без ссылок на ее работу. В книге приведены результаты многочисленных экспериментальных данных по срабатыванию ПК, в которых подтверждено наличие гистерезиса, отмечена зависимость его формы и размера от многих факторов, в том числе от формы проточной части входного патрубка и грибка (тарелки) (рис. 2). Отметим, что Татьяна Федоровна, описывая рабочие свойства ПК, использовала термины «характеристика $p = p(h)$ », где p — давление в защищаемом объеме, а h — высота подъема тарелки (грибка), избегая применения таких понятий как гистерезис и статическая характеристика. Зато она ввела понятие коэффициента подъемной силы, действующей на грибок, широко используемое другими авторами. Кстати, в германоязычной литературе [3], так же, как и в нашей, термин «гистерезис» не используют, а вводят свое название этого эффекта — «зависимость высоты подъема грибка над седлом от давления в защища-

¹ Пензенский завод трубопроводной арматуры. URL: <http://www.pzta.ru>

² Emerson. URL: <http://www.emerson.com/ru-ru/catalog/pressure>

³ ГОСТ 24570–81. Клапаны предохранительные паровых и водогрейных котлов. Технические требования. М., 1987.

емом объеме» или коротко «характеристика открытия» (Öffnungscharakteristiken).

Сравнивая результаты опытов, приведенных на рис. 1 и 2, мы вправе задать вопрос: а можно ли привести к одной кривой результаты, приведенные на рис. 2, как это сделано для всего семейства ПК фирмы Emerson (рис. 1)? Т.Ф. Кондратьева, например, опираясь на результаты анализа, в своей книге ответила на этот вопрос отрицательно.

Кстати, характеристика $\beta = \beta(\delta)$, которую можно построить по результатам испытаний, проведенных другой организацией, ARI-Armaturen GmbH [3], совпадает с кривой на рис. 1, что скорее всего не случайно. Эффект гистерезиса экспериментально настолько изучен, что, например, в канадском справочнике по предохранительным клапанам [4], кроме демонстрации гистерезиса на известных ПК фирмы Тусо, показано, каким образом можно «подкрутить нужную гайку», чтобы при этом оперативно изменить форму и размер петли гистерезиса.

В следующей работе Т.Ф. Кондратьевой с соавт. [5] сделана попытка описать динамические свойства ПК в сочетании с защищаемым объемом и трубопроводами «после». Отметим, что приведенное ими уравнение динамики выглядит в самых общих чертах, при этом авторами неоправданно рекомендовано его линеаризовать (для оценки устойчивости по критерию Рауса – Гурвица), что не дает возможность использовать это уравнение для выделения в нем условия равновесия ввиду явной нелинейности зависимости.

Между тем в Европе в исследовательских и практикующих кругах [6] считают, что современное

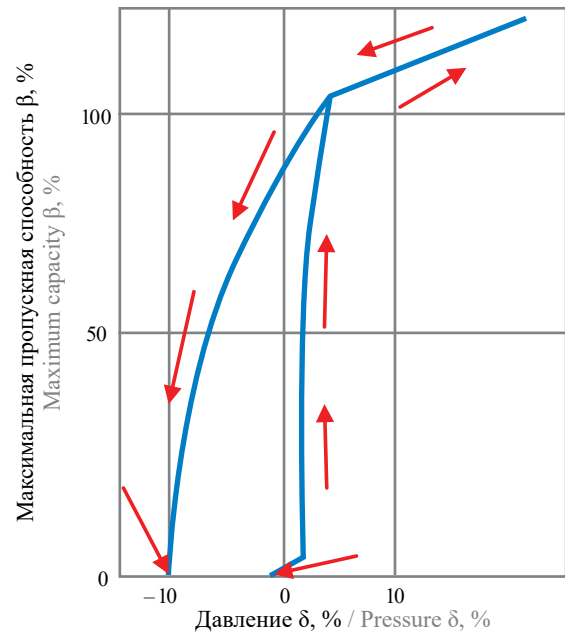


Рис. 1. Статическая характеристика клапанов Emerson
Fig. 1. Static characteristics of Emerson valves

(во всяком случае на 2016 г.) состояние теории и расчетов параметров ПК проблемно, так как даже лучшие инженерные практики (Recognized And Generally Accepted Good Engineering Practices) до сих пор не подтверждены научно. Авторы также считают, что нельзя доверять и некоторым пунктам стандарта API (American Petroleum Institute). Как указывают авторы статьи, тому подтверждением являются, например, результаты исследования Hös et al. [7] и А.А. Aldeeb et al. [8].

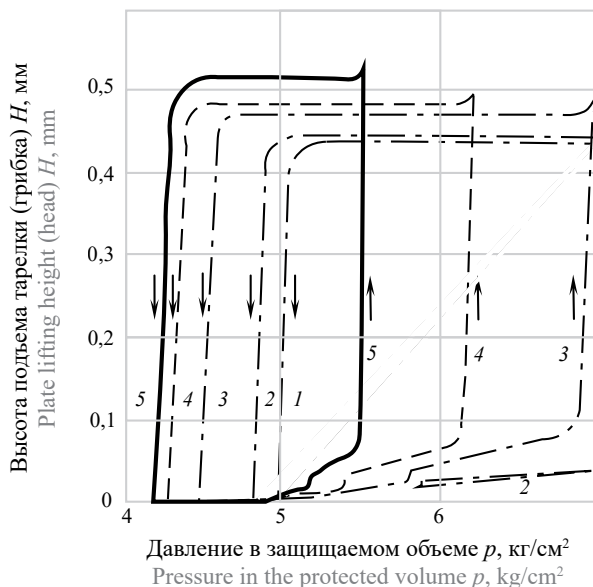
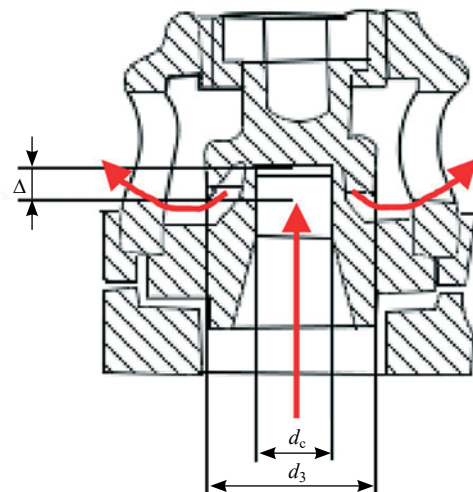


Рис. 2. Экспериментальные кривые $H = f(p_b)$ у ПК с $d_c = 14,4$ мм при $k_s = 15\,500$ Н/м, $d_c/d_3 = 2,0$ и различных значениях Δ/d_c : 1 — $\Delta/d_c = 0,15$; 2 — $\Delta/d_c = 0,20$; 3 — $\Delta/d_c = 0,30$; 4 — $\Delta/d_c = 0,35$; 5 — $\Delta/d_c = 0,40$
Fig. 2. Experimental curves $H = f(p_b)$ at SV with $d_c = 14.4$ mm at $k_s = 15,500$ N/m, $d_c/d_3 = 2.0$ and different values of Δ/d_c : 1 — $\Delta/d_c = 0.15$; 2 — $\Delta/d_c = 0.20$; 3 — $\Delta/d_c = 0.30$; 4 — $\Delta/d_c = 0.35$; 5 — $\Delta/d_c = 0.40$



Согласно публикации А. Borg et al. [9], наличие гистерезиса в работе ПК способствует подавлению акустических колебаний во входном или выходном трубопроводах. Однако в численной модели авторы предположили наличие наперед заданного гистерезиса. Достоинство работы было бы значительно выше, если бы гистерезис появился бы в процессе эволюции расчетов процесса работы ПК. Более простая задача была решена в работе [10], в которой показано, что трение на подвижных частях влияет на размер петли гистерезиса: чем больше сила трения, тем больше петля.

Иногда некоторые авторы, например Н. Верго и Р. Moussou [11], исследуя численными методами участие ПК в акустических колебаниях, возникающих в трубопроводах «до» ПК, обходят вниманием влияние гистерезиса на этот процесс, что весьма ограничило ареал ПК, на которые распространяются их выводы по исследованиям.

Группы исследователей из НИУ МГТУ [12, 13] и из Китая [14] различными методами, экспериментальными и численным моделированием, изучали поведение клапана на отдельных этапах гистерезиса: при подъеме и (или) при посадке на седло, а также при его взаимодействии с трубопроводами.

Интересные работы сделаны исследователями из Самарского государственного аэрокосмического университета [15, 16], в которых с опорой на уравнения газовой динамики получена зависимость «подъемной силы» клапана от высоты подъема грибка (тарели) над седлом. Сравнивая газодинамические силы и усилие пружины графоаналитическим методом, авторами найдено, что в некоторых случаях число точек равновесия при одном и том же давлении на входе в клапан может достигать до трех. Также было высказано предположение, что одна из них неустойчива. К сожалению, численные и графоаналитические методы по своей результативности соразмерны с единичным физическим опытом и потому не обладают общностью настолько, чтобы оценить устойчивость равновесия действующих сил в каждой из точек.

В следующих работах сделано предположение, что, возможно, при сверхкритических отношениях давления газа на входе и выходе из клапана положение скачка уплотнения в проточной части изменяется в зависимости от положения грибка. А это влияет на величину «подъемной силы», что, возможно, является условием, при котором возникает скачкообразное изменение положения грибка (тарели).

В работе [17] при проведении численного эксперимента смещение скачка уплотнения нашло подтверждение. В работе [18] эффект смещения скачка уплотнения в проточной части клапана был использован в математической модели, в которой было

продемонстрировано, что смещение скачка может быть причиной гистерезиса в характеристике ПК, работающем на сверхзвуковых режимах.

Экспериментальная работа У. Рочека [19], процитированная Т.Ф. Кондратьевой [2], по своим результатам уникальна. В ней доказано, что состояние равновесия сил, действующих на подвижные части ПК, достигается в значительно большем числе положений грибка над седлом, чем наблюдается реально при работе ПК. Точки равновесия составляют единую непрерывную линию, имеющую устойчивую и неустойчивую ветви (рис. 3). Полученную линию вполне обосновано можно назвать линией равновесия, часть которой имеет отрицательную производную dh/dp_k и не реализуется на практике. На графике $h/d = f(p)$ точками и аппроксимационной сплошной линией обозначена вся траектория равновесия. В рабочем процессе (пунктирная линия) при нарастании давления, начиная с момента отрыва от седла, грибок несколько приподнимается в соответствии с линией равновесия, затем, дойдя до точки перегиба кривой, резко поднимается вверх до упора в ограничитель. При спаде давления в защищаемом объеме грибок находится в верхнем положении до достижения давлением значения равновесия, затем резко устремляется на седло. Таким образом формируется реальный гистерезис.

Видно также, что чем жестче пружина, тем правее находится график, тем меньше размер гистерезиса.

Отметим, что этот результат, как и все рассмотренные, относятся к ПК, которые работают на сверх-



Рис. 3. Зависимость положения грибка клапана от давления в защищаемом объеме (p_k — давление; h — высота подъема грибка; d — диаметр входного патрубка): 1 — при жесткости пружины $k_n = 7,29$ кг/см; 2 — при $k_n = 17,4$ кг/см

Fig. 3. Dependence of the valve head on pressure in the protected volume (p_b — pressure; h — head lift height; d — inlet nozzle diameter): 1 — at spring stiffness $k_s = 7.29$ kg/cm; 2 — at $k_s = 17.4$ kg/cm

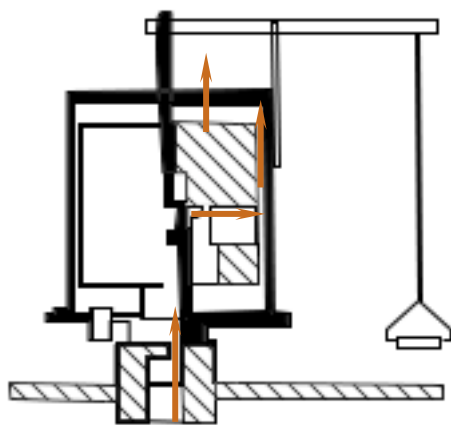


Рис. 4. Схема грузового ПК КПС-07-350: диаметр входного патрубка $d_y = 32$ мм, $m = 5,6$ кг

Fig. 4. Scheme of load SV KPS-07-350: inlet nozzle diameter $d_y = 32$ mm, $m = 5.6$ kg

критических режимах. Автором [20] экспериментально установлено, что на докритических режимах работы ПК также имеют гистерезис. Результат был получен при испытаниях ПК типа КПС-07-350 (производство завода им. Войкова (Москва), автор изобретения В.Д. Шеренцис) грузового типа (рис. 4) и клапана «Сержант» пружинного типа⁴ (рис. 5), установленных на паровом котле ВКВ-300М (производство мехзавода п. Вязы Курской обл.), рабочее давление которого не выше 0,07 МПа. Результаты испытаний ПК приведены на рис. 6, а на рис. 7 — итог их пересчета применительно к зависимо-

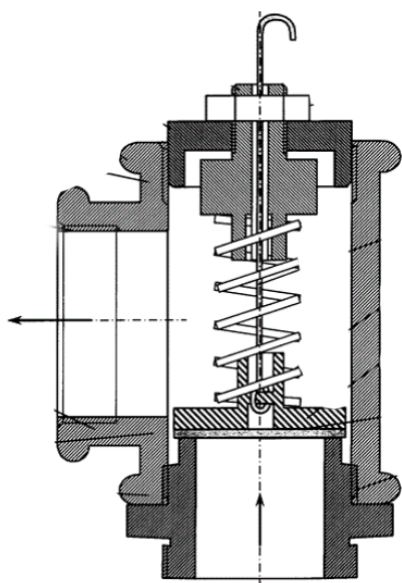


Рис. 5. Схема и фото пружинного ПК «Сержант»: $d_y = 32$ мм, жесткость пружины $k_n = 2800$ Н/м

Fig. 5. Scheme and photo of spring SV “Sergeant”: $d_y = 32$ mm, spring stiffness $k_s = 2,800$ N/m

⁴ Патент № 69953 Российская Федерация, МПК F16K 17/04 (2006 01). Клапан предохранительный: 2007136515/22; заявл. 02.10.2007; опубл. 10.01.2008 / Поландов Ю.Х., Власенко С.А., Пахомов С.Д.; заявитель ОрелГТУ. 4 с.

сти $h = f(p_k)$. Видно, что размер петли гистерезиса у КПС-0,7 составляет около 50 % от давления срабатывания, что намного больше нормативного.

Из этого эксперимента вытекает еще одно важное следствие, которое заключается в том, что роль скачка уплотнения в формировании петли гистерезиса, возможно, переоценена, если петля существует и без него. Следовательно, есть нечто общее в смысле влияния на образование петли гистерезиса при докритическом и сверхкритическом режимах течения потока через ПК. В связи с этим и ввиду того, что аналитически перемещение места положения скачка уплотнения в процессе движения грибка описать проблемно, имеет смысл рассматривать докритические течения через ПК, которые можно аналитически достаточно адекватно описать и распространить выводы и на сверхкритические режимы.

Среди работ, направленных на аналитическое описание петли гистерезиса, известна только одна работа [20], в которой рассмотрены процессы в ПК, работающих при давлениях не выше 0,07 МПа избыточных. В работе исследована линия равновесия сил и после применения признака устойчивости в малом, показано, что на ней есть устойчивые

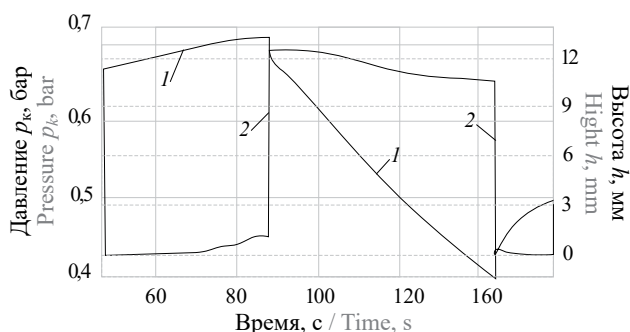


Рис. 6. Испытания ПК «Сержант» на паровом котле ВКВ-300М ($k_n = 2800$ Н/м): 1 — давление; 2 — высота грибка над седлом

Fig. 6. Tests of SV “Sergeant” at steam boiler VKV-300M ($k_s = 2,800$ N/m): 1 — pressure; 2 — height of the head above the seat

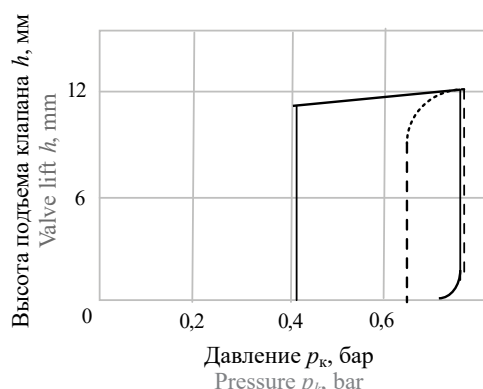


Рис. 7. Результаты пересчета данных испытаний рис. 6 ПК КПС 0,7 (сплошная линия) и ПК «Сержант» (пунктирная)

Fig. 7. The results of recalculation of the test data of Fig. 6 SV KPS 0.7 (solid line) and SV “Sergeant” (dotted line)

и неустойчивые участки. Компонуя устойчивые участки, сформирована петля гистерезиса. В плане описания петли гистерезиса принятый способ анализа оказался результативным и показательным, однако в данной работе при составлении баланса действующих сил не были учтены несколько важных факторов, например изменение угла натекания потока на грибок при его подъеме, что снизило уровень адекватности примененной модели.

Таким образом, существование гистерезиса известно давно, хотя название этого эффекта различно на разных языках. Гистерезис знаком практически только по результатам экспериментальных исследований. Изучены факторы, влияющие на размер его петли, даны даже рекомендации по изменению ее формы и размеров. Объяснена также причина возникновения гистерезиса путем сравнения газодинамических сил и усилия пружины. Сравнение сделано графоаналитическим методом, не обладающим общностью суждений. Опытным путем найдены условия подобия, хотя теоретически они не обоснованы. Установлено, что петля гистерезиса характерна для всех ПК, работающих в диапазоне давлений в защищаемом объеме от докритических до сверхкритических.

Проведенная ранее автором попытка математического описания гистерезиса на основе анализа уравнения равновесия сил $h = f(p_k)$ с оценкой устойчивости на отдельных характерных ее участках показала перспективность такого подхода, хотя приведенное уравнение равновесия не совсем точно отражало условие равновесия сил, действующих на подвижные части клапана.

Цель исследования — аналитическим путем решить задачу построения петли гистерезиса в работе предохранительного клапана прямого действия, уточнив уравнение равновесия сил, действующих на подвижные части клапана.

Рабочая гипотеза — резкое движение грибка клапана вверх с седла до упора в ограничители при достижении в защищаемом объеме расчетного давления и резкое движение грибка вниз на седло при снижении давления есть результат перескока грибка с одного устойчивого положения на другое, минуя неустойчивый участок характеристики клапана.

Метод исследования — теоретический, с использованием законов газовой динамики, механики, теории устойчивости и теории подобия, в том числе с уточнением условий равновесия сил, действующих на подвижные части предохранительного клапана. Затем при использовании первого признака устойчивости М.А. Ляпунова произведен отбор участков устойчивости на линии равновесия и построена статическая характеристика клапана, имеющего в своем составе петлю гистерезиса.

Условия равновесия сил, действующих на подвижные части ПК

Задача решалась в плоском варианте. Течение через ПК принято дозвуковым (докритическим). Для ее решения составлено уравнение баланса сил, действующих на подвижные части ПК. Решим задачу с получением зависимости положения грибка над седлом от давления в котле, $h = h(p_k)$, где h — высота подъема грибка над седлом, а p_k — давление в котле, т.е. построим статическую характеристику ПК. Чтобы учесть наиболее полно действующие силы, была использована некоторая обобщенная конструкция предохранительного клапана (рис. 8), которая сочетает в себе элементы пружинного и грузового типов. Ось координат совмещена с осью симметрии клапана и направлена вверх, а начало расположено в плоскости верха входного патрубка.

При составлении уравнений отмечено, что взаимодействие потока газа и подвижных частей характерно двумя режимами. Первый из них — режим, при котором узким сечением является пространство между грибком и седлом, и давление под грибком зависит от его положения над седлом. И другой — течение в патрубке не зависит от положения грибка, а из патрубка истекает свободная струя, статическое давление в которой равно или почти равно атмосферному. Это суждение подтверждается результатами продувки клапана КПС-0,7 (рис. 9, [20]), во время которых определялась зависимость коэффициента расхода A от высоты поднятия грибка h (точнее: $h' = h/d$ или $h^* = h \cdot \sin\varphi/d$) в пересчете на его проходное сечение, где d — диаметр патрубка, м; φ — половина угла конусности контактной поверхности грибка, $\varphi = 45^\circ$.

Абсцисса выбрана безразмерной, чтобы обеспечить подобие этой группы ПК. Видно, что для таких клапанов на участке h^* от 0 до 0,35 значение

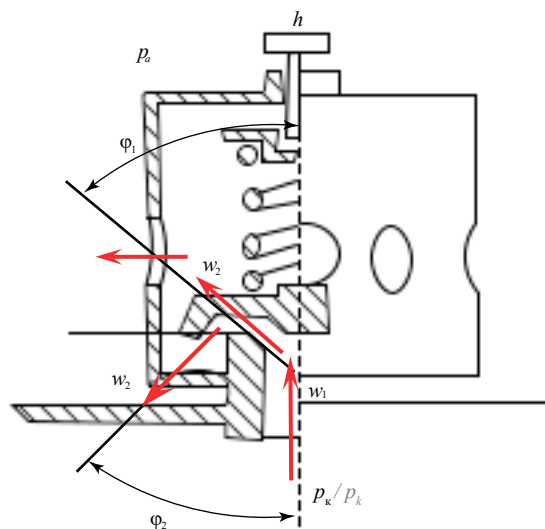


Рис. 8. Обобщенная конструкция предохранительного клапана
Fig. 8. Generalized design of the safety valve

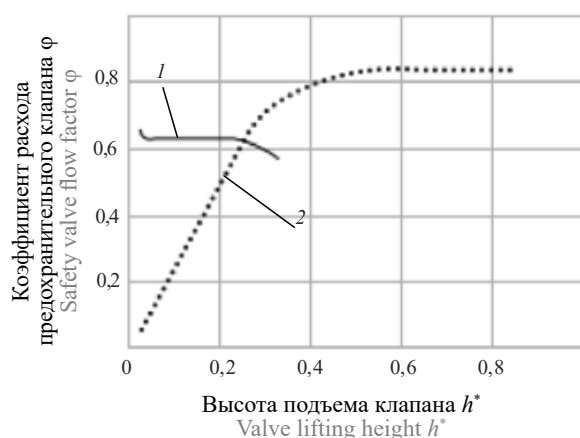


Рис. 9. Зависимость коэффициента расхода предохранительного клапана от высоты подъема клапана

Fig. 9. Dependence of safety valve flow coefficient on valve lifting height

коэффициента расхода имеет практически линейную зависимость от h^* :

$$A = 2,4h^*. \quad (1)$$

На участке по $h^* > 0,35$ коэффициент расхода не зависит от положения грибка, что означает, что гидросопротивление клапана в этих условиях практически состоит только из сопротивления патрубка, из которого истекает свободная струя. У испытанного образца в положении полного подъема грибка $A_{\max} = 0,82$. Без большого ущерба для решения поставленной задачи влияние давления, действующего на грибок или груз, со стороны пространства кожуха, так называемого противодействия, не было принято во внимание.

Область под грибком была разбита на три зоны: зона под грибком с площадью, равной сечению входного патрубка; вторая зона представлена узким местом проточной части клапана между седлом и грибком; третья зона — часть площади грибка, по которой действует свободная струя потока. Поток втекает в первую зону со скоростью $\vec{w}_1$ и вытекает из нее с этой же скоростью, но под углом φ к оси; во вторую зону поток втекает под углом φ и скоростью $\vec{w}_2$ и вытекает с этими же параметрами; в третью зону поток поступает под углом φ и скоростью $\vec{w}_2$ и вытекает в атмосферу под углом φ_2 со скоростью $\vec{w}_2$.

Тогда равновесие сил, действующих на грибок, в пределах изменения высоты подъема грибка $h^* < 0,35$ может быть представлено уравнением, составленным по проекциям векторов на ось h . При этом учтено, что сумма количеств движения, рассчитанных по проекциям векторов потока в узком месте из-за равенства векторов на входе и выходе из этой зоны, равна 0:

$$(p_1 - p_a)F + mw_1 - mw_1k_1 + mw_2k_1 - (-mw_2)(-k_2) - Mg - R - k_n h = 0; \quad (2)$$

а на участке $h^* > 0,35$, где $p_1 = p_a$, $k_1 = 1$, $w_1 = w_2$ (модули векторов) и $k_1 = 1$, уравнение вырождается:

$$mw_1(1 + k_2) - Mg - R - k_n h = 0, \quad (3)$$

где p_1, p_a — статическое давление пара под грибком до узкого сечения и атмосферное, соответственно, Па;

F — площадь проходного сечения патрубка, m^2 ;

m — расход пара, кг/с;

w_1 — модуль скорости пара во входном патрубке, на входе в первую зону, м/с;

w_2 — модули скоростей в узком месте, а также при натекании на грибок под углом φ_1 и истока из-под него под углом φ_2 , м/с;

$k_1 = \cos\varphi_1$;

φ_1 — угол между вектором потока в узком сечении и осью;

$k_2 = \cos\varphi_2$;

φ_2 — угол между вектором потока на выходе из-под грибка и осью;

k_n — жесткость пружины, Н/м;

M — масса подвижных частей клапана, кг;

g — ускорение земного тяготения, м/с²;

R — усилие предварительного сжатия пружины, Н.

В (2) первое слагаемое представляет усилие, производимое на грибок за счет перепада на нем давления в первой зоне; второе — количество движения потока в патрубке, вносимое в первую зону; третье — количество движения, уносимое потоком из первой зоны; четвертое — количество движения потока, воздействующее на грибок во второй зоне; пятое — количество движения, уносимое из второй зоны; шестое, седьмое и восьмое — вес груза и усилие сжатия пружины. Заметим, что пятое слагаемое дважды отрицательно: первый раз за счет уноса количества движения из третьей зоны, а во второй раз — за счет того, что вектор количества движения направлен в отрицательную сторону оси. В (3) первое слагаемое представляет количество движения, натекающее в первую зону на грибок и вытекающее из-под него, остальные — *see above*.

В дальнейшем будем различать направление вектора потока (угол φ) и направление образующей границы (угол α), в которые заключен поток, направления могут совпадать или не совпадать. В первом случае это типично для ПК, у которых посадочное место на седле конусообразное ($k_1 = \text{const} \neq 0$), а во втором — плоское (соответственно, $k_1 = 0$ и $k_2 = 0$). При этом допущено, что вектор скорости потока в узком месте и вектор потока, истекающего из-под грибка, хоть и разнонаправлены, но имеют одинаковые модули.

Уравнение (3) известно и широко используется в публикациях, а потому его решение не представляет интереса.

Решение уравнения равновесия для случая $h^* < 0,35$ и $k_1 = \text{const} \neq 0$

Рассмотрим сначала случай, когда вектор движения потока в узком месте параллелен границам ($\varphi = \alpha$), что характерно для ПК, у которых место посадки грибка на седло имеет не плоскую, а коническую форму.

Произведем преобразование (2), заменив все параметры, изменяющиеся в процессе работы клапана (конструктивные и гидравлические данные клапана считаются известными), через два основных: давление в котле p_k и высоту подъема клапана над седлом h^* .

Использование для расчета расхода через клапан формулы, приведенной в стандарте⁵, приведет к ошибке, так как она предназначена для котлов повышенного давления, у которых отношение атмосферного давления к давлению в котле ($\beta = p_a/p_k$) менее 0,577, что характерно для области для звуковых и сверхзвуковых течений через ПК. При давлении в котле до 0,7 бар отношение β принимает значения 0,588 и более, что означает, что течение через клапан для малых котлов находится в дозвуковой области. Обратим внимание также на то, что граница изменения течений между сверхзвуковым и дозвуковым близка признаку, по которому малые котлы выделены в особую группу. Такое совпадение скорее всего неслучайно.

В дозвуковой области расход газа рассчитывается по формуле:

$$m = \alpha K q F (p_k \cdot \rho)^{0,5}, \quad (4)$$

где K — постоянная, для насыщенного пара $K = 0,667$; q — функция, удачно аппроксимируемая уравнением:

$$q = \left[1 - \left(\frac{e - e^*}{1 - e^*} \right)^2 \right]^{0,5}; \quad e = \frac{p_a}{p_k};$$

e^* — второе критическое отношение давлений для конструкции типа входного патрубка $e^* = 0,22$;

ρ — плотность пара в котле, кг/м^3 .

При пользовании (4) для полноподъемных клапанов в режиме срабатывания, как правило, все параметры, входящие в нее, в том числе и коэффициент расхода, известны, и расчет пропускной способности не представляет трудностей. В общем случае значения этого коэффициента при промежуточном положении грибка клапана можно воспользоваться (1).

Значение плотности пара однозначно определяется по кривой насыщения (на малых паропро-

вых котлах через предохранительный клапан течет насыщенный пар) по заданному давлению в котле, $\rho \approx 1 \text{ кг/м}^3$ в исследуемой области.

Скорость потока в узком сечении можно выразить через уже известные параметры:

$$w_2 = Kq \left(\frac{p_k}{\rho} \right)^{0,5} e^{-(1/\gamma)}, \quad (5)$$

где $\rho = 1,3$ — показатель адиабаты для насыщенного пара.

Количество движения $m w_2$ получим перемножив (4) и (5), с учетом (1):

$$m w_2 = 2,4 B F h^*,$$

где $B = K^2 q^2 \cdot p_k \cdot e^{-0,77}$.

Значение B с ошибкой не более 2 % аппроксимируется менее сложно во всем исследуемом диапазоне рассматриваемых значений давления в котле, $\rho \approx 1 \text{ кг/м}^3$:

$$B = 3(p_k - p_a). \quad (6)$$

В итоге количество движения в узком сечении в простой записи выглядит так:

$$m w_2 = 7,2 F \cdot (p_k - p_a) h^*. \quad (7)$$

Для расчета количества движения в патрубке применим условие неразрывности потока для несжимаемой жидкости:

$$w_1 = \frac{w_2 F_2}{F} = \frac{4\pi w_2 d_1 h \cos \varphi}{\pi d_1^2} = 4 w_2 h^* \quad (8)$$

и

$$m w_1 = 28,8 F (p_k - p_a) h^{*2}. \quad (9)$$

Неизвестное значение давления под грибком p_1 найдем через p_k , используя закон Бернулли:

$$p_1 = p_k - \frac{1 + \xi}{2} \rho_1 w_1^2, \quad (10)$$

где 1 и ξ — коэффициенты потерь давления на ускорение потока и сопротивление во входном патрубке;
 $\xi = 0,49$.

Перед постановкой (10) в (2) учтем некоторые соотношения:

$$(p_{k0} - p_a) F = M g + R$$

и

$$0,5 \rho w_1^2 (1 + \xi) F = 0,75 m w_1,$$

а в выражение $(p_1 - p_a) F$ в скобки добавим и вычтем член p_{k0} , равный давлению в котле, при котором

⁵ ГОСТ 24570–81. Клапаны предохранительные паровых и водогрейных котлов. Технические требования.

срабатывает предохранительный клапан. Тогда получим:

$$\begin{aligned}(p_1 - p_a)F &= (p_k - p_{k0} + p_{k0} - p_a - 0,5\rho w_1^2(1 + \xi))F = \\ &= (p_{k0} - p_a)F - (p_{k0} - p_k)F - 0,75mw_1 = \\ &= Mg + R + (p_k - p_{k0})F - 0,75mw_1.\end{aligned}\quad (11)$$

Соберем все полученные выражения и подставим их в исходное (2):

$$\begin{aligned}Mg + R + (p_k - p_{k0})F - 0,75mw_1 + \\ + mw_1 - mw_1k_1 + mw_2k_1 + mw_2k_2 - \\ - Mg - R - k_n h = 0,\end{aligned}$$

приведем подобные члены и заменим mw_1 и mw_2 через их выражения (7) и (9):

$$\begin{aligned}(p_k - p_{k0})F + 28,8(0,25 - k_1) \times \\ \times F(p_k - p_a)h^{*2} + 7,2 \cdot F(p_k - p_a) \times \\ \times h^*(k_1 + k_2) - k_n h = 0.\end{aligned}$$

Разделим все члены уравнения на F и расставим их в порядке убывания степени h^* :

$$\begin{aligned}28,8 \cdot (0,25 - k_1)(p_k - p_a)h^{*2} + \\ + 7,2 \cdot (p_k - p_a)(k_1 + k_2)h^* + \\ + p_k - p_{k0} - \frac{k_n dh^*}{F \sin \varphi} = 0,\end{aligned}\quad (12)$$

где $h = h^*d/\sin \varphi$.

Решением (12), согласно поставленной задаче, является зависимость в виде $h^* = f(p_k)$, но для этого воспользоваться прямыми аналитическими методами затруднительно, особенно в случаях переменного направления вектора w_2 , когда в уравнении окажется h^{*3} . Решение уравнения удобно вести относительно p_k и затем преобразовать его в ожидаемом виде. Преобразование возможно аналитическим способом, но это громоздко, а если воспользоваться современными программными приложениями, например *Paint*, то графики $p_k = f(h^*)$ достаточно просто преобразовать в $h^* = f(p_k)$.

Для решения (12) раскроем скобки, содержащие p_k , затем прибавим и вычтем в уравнении p_a , и вынесем за скобки p_k и p_a :

$$\begin{aligned}p_k [28,8(0,25 - k_1)h^{*2} + 7,2 \cdot (k_1 + k_2)h^* + 1] - \\ - p_a [28,8(0,25 - k_1)h^{*2} + 7,2(k_1 + k_2)h^* + 1] - \\ - \frac{k_n dh^*}{F \sin \varphi} - p_{k0} + p_a = 0.\end{aligned}$$

Так как $\sin \varphi = \sqrt{1 - k_1^2}$, то:

$$p_k = p_a + \frac{p_{k0} - p_a + \frac{4k_n h^*}{\pi d \sqrt{1 - k_1^2}}}{28,8(0,25 - k_1)h^{*2} + 7,2(k_1 + k_2)h^* + 1}.\quad (13)$$

Полученное уравнение является общим для предохранительных клапанов прямого действия, у которых посадочные поверхности (узкое место) имеют конусообразную форму.

Решение уравнения равновесия для случая $h^* < 0,35$ и $k_1 = \text{var}$

При плоском днище грибка ($k_1 = \text{var} = k_0, k_2 = 0$) (var — под знаком радикала $k_1 = 0$) линии тока на выходе из патрубка не повторяют линии границ, а на повороте закрутятся плавно, поджимаясь под действием центробежных сил к грибку, как показано на численном эксперименте A. Gastberg et al. [3] (рис. 10) и на рис. 11. Это объясняет взаимодействие потока с грибком на скорости, равной скорости в узком сечении, под некоторым углом α_1 к оси. Если учесть, что при очень малой высоте подъема грибка, $h^* \rightarrow 0$, вектор скорости потока совпадает с границей поверхности седла ($\cos \alpha_1 = 1$), а при $h_{\text{max}}^* = 0,35$ вектор скорости параллелен оси (поток — свободная струя), соответственно $\cos \alpha_1 = 1$, то в качестве первого приближения можно принять зависимость $\cos \alpha_1$ от h^* линейной:

$$k_0 = \cos \alpha_1 = h^*/h_{\text{max}}^*.$$

В этом случае в (13) вместо k_1 подставим k_0 ,

$$p_k = p_a + \frac{p_{k0} - p_a + \frac{4k_n h^*}{\pi d}}{28,8(0,25 - k_0)h^{*2} + 7,2(k_0 + k_2)h^* + 1}.\quad (14)$$

Зависимость равновесия сил от конструктивных особенностей клапана

С целью удобства систематизации полученных данных выделена так называемая базовая кривая для того, чтобы путем сравнения с ней определять влияние конструктивных особенностей клапана. Отметим, что область изменения кривых равно-

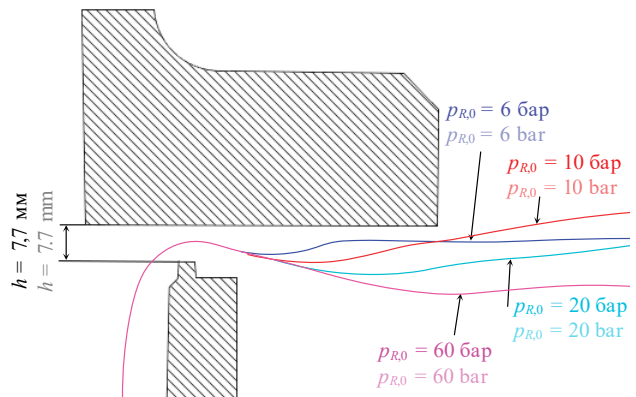


Рис. 10. Средняя линия тока в узком сечении клапана по A. Gastberg et al. [3] (численный эксперимент)
Fig. 10. Mean current line in a narrow valve cross-section according to A. Gastberg et al. [3] (numerical experiment)

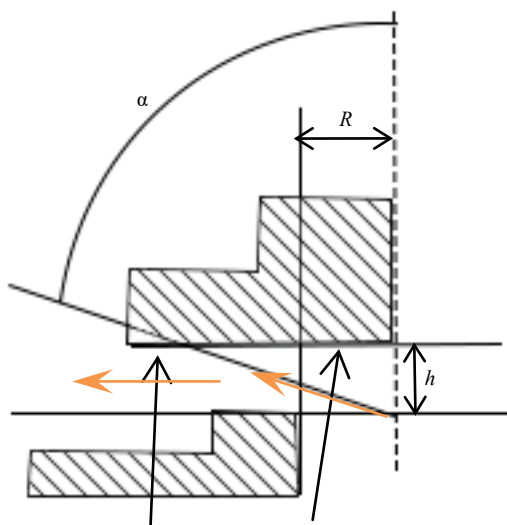


Рис. 11. К расчету отклонений вектора скорости под грибком при его подъеме

Fig. 11. Calculation of deviations of the velocity vector under the head during its lifting

весия заполнена реальным содержанием только при значениях h^* от 0 до 0,35, так как, с одной стороны, грибок не опускается ниже седла, $h^* \geq 0$, и, во-вторых, при $h^* > 0,35$ — клапан полностью раскрывается и потому на практике, как правило, на этой высоте или около этого располагаются упоры — верхние ограничители.

Базовая кривая равновесия при $k_1 = \text{var} = k_0$, $k_2 = 0$ и $k_n = 0$. Этим значениям конструктивных элементов соответствуют грузовые ПК с плоской поверхностью контакта между грибком и седлом. Базовая кривая равновесия рассчитана по (14) и представлена кривой 1 на рис. 12, которая лежит в области, расположенной слева от $p_{к0}$ и поднима-

ется выше $h^* = 0,35$ и при давлении в защищаемом объеме 1,85 бара.

Влияние конусности поверхности между грибком и седлом. На рис. 12 показана рассчитанная по (13) кривая равновесия при $k_n = 0$ (кривая 2). Видно, что конусность приводит к сдвигу кривой равновесия влево по сравнению с базовой, при этом значение $h^* = 0,35$ достигается при $p_k = 1,5$ бара. При расчете подразумевается постоянство угла ϕ в процессе подъема грибка и, соответственно, $k_1 = \text{const}$.

Влияние отбортовки. На том же рисунке этому соответствует кривая 3, угол отклонения потока при отбортовке принят 45° , $k_2 = 0,7$, при плоской поверхности узкого места $k_1 = \text{var}$. Отбортовка заметно сильнее сдвигает линию равновесия влево, чем конусность. Равновесие при высоте $h^* = 0,35$ сохраняется при снижении давлении в защищаемом объеме вплоть до 1,2 бара.

Влияние пружины. Это влияние показано на рис. 13, кривые 1 и 2. Пружины сдвигают линию равновесия в отличие от изменения формы проточной части от плоского контакта грибка и седла вправо. И чем больше жесткость пружины, тем правее смещается линия равновесия.

Совместное влияние пружины и отбортовки. Результаты расчетов приведены на рис. 13, кривая 3. Видно, что отбортовка сильно влияет на условие равновесия, она сдвигает линию равновесия далеко влево. В приведенном случае практически нивелируется влияние пружины.

Сравнивая влияние рассмотренных факторов на условие равновесия, можно сделать вывод, что форма узкого сечения мало влияет на условие равновесия, а отбортовка грибка и пружина, напротив, влияют существенно.

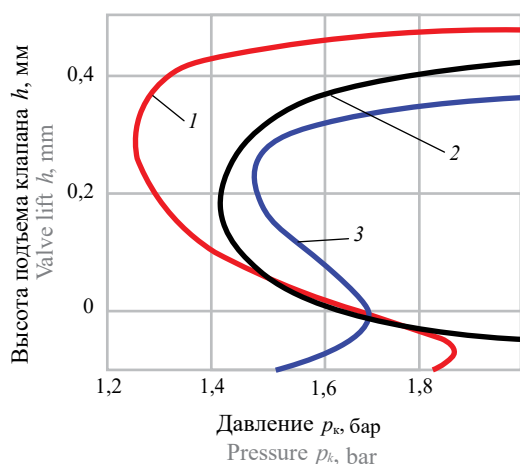


Рис. 12. Линия равновесия сил для грузовых ПК ($k_n = 0$): 1 — базовая, $k_1 = \text{var}$ и $k_2 = 0$; 2 — $k_1 = 0,7$ и $k_2 = 0$; 3 — $k_1 = 0$ и при $k_2 = 0,7$

Fig. 12. Line of equilibrium of forces for load SV ($k_s = 0$): 1 — baseline, $k_1 = \text{var}$ and $k_2 = 0$; 2 — $k_1 = 0.7$ and $k_2 = 0$; 3 — $k_1 = 0$ and at $k_2 = 0.7$

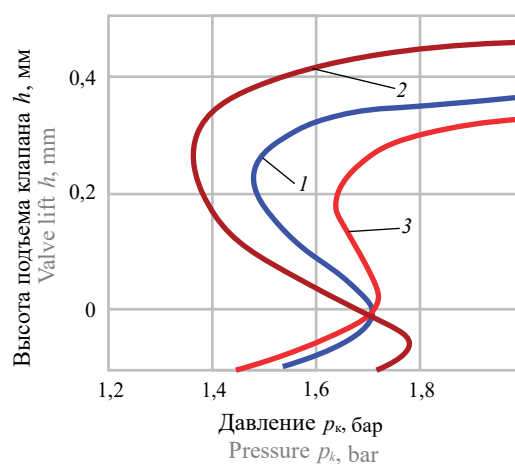


Рис. 13. Линия равновесия сил для пружинных ПК: 1 — базовая кривая; 2 — $k_1 = \text{var}$, $k_2 = 0,7$, $k_n = 2800$ Н/м; 3 — $k_1 = \text{var}$, $k_2 = 0$ и $k_n = 2800$ Н/м

Fig. 13. Force equilibrium line for spring SV: 1 — base curve; 2 — $k_1 = \text{var}$, $k_2 = 0.7$, $k_s = 2,800$ N/m; 3 — $k_1 = \text{var}$, $k_2 = 0$ and $k_s = 2,800$ N/m

Анализ устойчивости равновесия сил на линии $h^*(p_k)$

Согласно линиям равновесия, приведенным на рис. 12 и 13, одному и тому же давлению p_k может соответствовать не одно значение h^* , а 2 или даже 3. Такая неоднозначность объясняется наличием участков характеристик, которые на практике не могут реализоваться из-за неустойчивости на отдельных участках линии равновесия. Проведем анализ устойчивости равновесия, используя первый признак А.М. Ляпунова, усматривающий устойчивость в их отдельных точках (участках) при малых отклонениях от положения равновесия.

При дисбалансе сил, действующих на подвижные части, грибок должен придти в движение. По характеру поведения грибка можно судить об устойчивости поведения в исследуемой точке кривой $h^* = h(p_k)$: если заданное приращение Δh^* (положительное или отрицательное) приводит к дальнейшему росту дисбаланса сил, то равновесие неустойчиво; если же грибок при заданном отклонении старается вернуться к линии равновесия, то в данной точке равновесие устойчиво.

Устойчивость на базовой линии. В этом случае ($k_1 = \text{var}$, $k_2 = 0$ и $k_{\text{ц}} = 0$) (12) переписывается так:

$$28,8 \left(0,25 - \frac{h^*}{h_{\text{max}}} \right) h^{*2} + \frac{7,2 h^{*2}}{h_{\text{max}}} + \frac{p_k - p_{k0}}{p_k - p_a} = 0. \quad (15)$$

А в возмущенном состоянии при конкретной точке линии при $p_k = \text{const}$ система приходит в движение и ее состояние опишется уравнением динамики:

$$M \frac{d^2 \Delta h^*}{dt^2} = 28,8 \left[0,25 - \frac{h^* + \Delta h}{h_{\text{max}}} \right] \times \left(h^{*2} + 2h^* \Delta h + \Delta h^2 \right) + 7,2 \frac{h^{*2} + 2h^* \Delta h + \Delta h^2}{h_{\text{max}}} + \frac{p_k - p_{k0}}{p_k - p_a}, \quad (16)$$

где M — положительная величина, пропорциональная массе подвижных частей клапана.

Вычтем из (16) (15) и пренебрежем величинами Δh^{*2} и Δh^{*3} как величинами высшего порядка малости:

$$\begin{aligned} M \frac{d^2 \Delta h^*}{dt^2} &= 14,4 h^* \Delta h^* - 86,4 \frac{h^*}{h_{\text{max}}} \Delta h^* + 14,4 \frac{h^*}{h_{\text{max}}} \Delta h^* = \\ &= (14,4 h_{\text{max}}^* - 86,4 h^* + 14,4) \frac{h^*}{h_{\text{max}}} \Delta h^*. \end{aligned}$$

При положительных значениях h^* и h_{max}^* устойчивость положения будет обеспечена при противо-

положных знаках левой и правой части уравнения. Так, при положительном значении Δh^* ускорение $M(d^2 \Delta h^*/dt^2)$ должно быть отрицательным и — наоборот. Этого можно достичь, если выражение в скобках будет меньше 0:

$$14,4 h_{\text{max}}^* - 86,4 h^* + 14,4 < 0.$$

Упрощая это неравенство, получим условие устойчивости $h^* > 0,225$. При меньших значениях h^* равновесие на линии равновесия неустойчиво.

Обратимся к рис. 12 к линии 1. Значению $h^* = 0,225$ на кривой соответствует точка перегиба кривой, в которой она меняет знак производной dh^*/dp_k . При $h^* > 0,225$ производная положительна, а при меньших значениях h^* — отрицательная. Это соответствует известному наглядному правилу анализа устойчивости при равновесии сил: при положительной производной положение устойчивое, а при отрицательной — неустойчивое.

Устойчивость грибка на седле. В малой окрестности седла уравнение динамики описывается (16) при $h^* = 0$:

$$\frac{p_k - p_{k0}}{p_k - p_a} = M \frac{d^2 \Delta h^*}{dt^2}. \quad (17)$$

Давление в котле p_k всегда больше p_a , поэтому знаменатель положителен. Числитель же при $p_k < p_{k0}$ отрицателен, поэтому при этих значениях p_k положение клапана на седле устойчиво. При приращениях Δh^* , которые могут быть только положительными, на участке $p_k - p_{k0} < 0$ знак производной будет всегда отрицательным. Это означает, что грибок непременно будет стремиться к седлу, клапан будет закрытым.

На практике этот эффект можно наблюдать принудительно открывая клапан при давлениях меньше давления открытия, $p_k < p_{k0}$, скажем, при $p_k = 1,5$ бар. Если приподнять грибок немного и отпустить, то клапан двинется обратно и закроется с резким звуком. Но если приподнять его достаточно высоко (за линию равновесия), то клапан энергично откроется сам с переходом на устойчивую ветку равновесия или к ограничителю.

Анализ оперативного определения устойчивых участков линии равновесия у других вариантов ПК можно делать используя правило знака производной.

Статические характеристики предохранительных клапанов. Петля гистерезиса

Определив устойчивые и неустойчивые участки линий равновесия сил, действующих на грибок, можно описать движение грибка клапана в координатах p_k и h^* . Траектория, которая составлена только

из устойчивых ветвей линии равновесия, образует статическую характеристику ПК.

Статическая характеристика базового варианта ПК, $k_1 = \text{var}$, $k_2 = 0$ и $k_n = 0$. Характеристика для базовой кривой 1 приведена на рис. 14 (часть координатного поля, где грибок не может появиться из-за механических ограничений, затемнена). Характеристику удобно описывать, двигаясь вдоль линии $h^* = 0$ по мере увеличения давления в котле от p_a до p_{k0} . На этом участке линии грибок прижат к седлу. Если давление перевалит за точку $p_{k0} = 1,7$ бара, то грибок пересекает линию равновесия, и силы, действующие на него, направлены вверх, куда он устремляется (ПК открывается) до упора в огра-

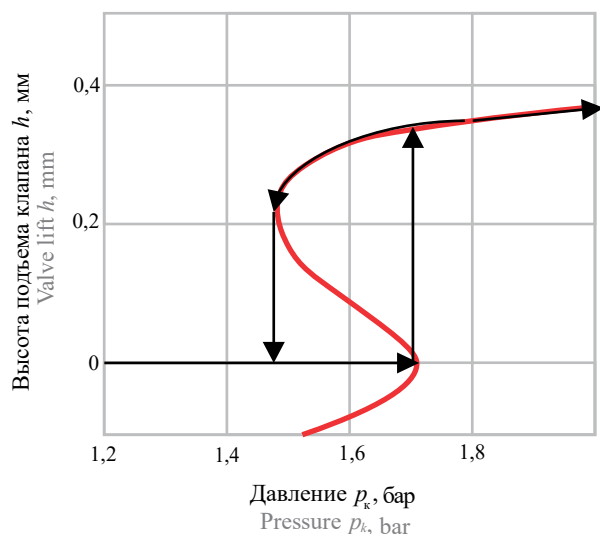


Рис. 14. Статическая характеристика грузового ПК при $k_1 = \text{var}$, $k_n = 0$ и $k_2 = 0$

Fig. 14. Static characteristic of load SV, at $k_1 = \text{var}$, $k_s = 0$ and $k_2 = 0$

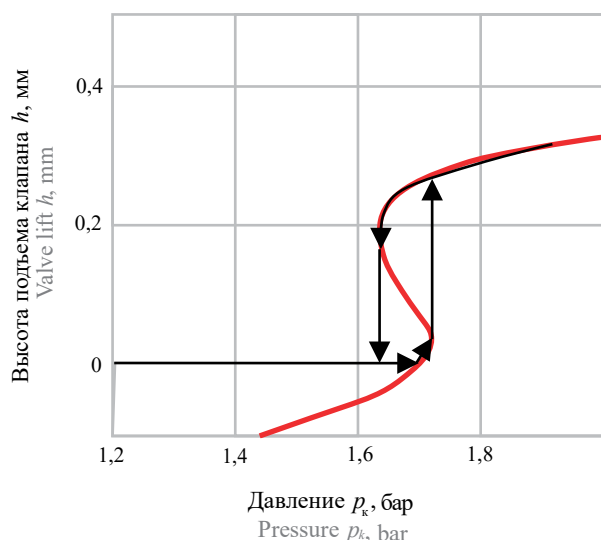


Рис. 17. Статическая характеристика пружинного ПК при $k_1 = \text{var}$, $k_n = 2800$ Н/м и $k_2 = 0$

Fig. 17. Static characteristic of spring SV, at $k_1 = \text{var}$, $k_s = 2,800$ N/m and $k_2 = 0$

ничители (принято $h^* = 0,4$). Грибок устойчиво остается вверх на ограничителях, пока давление в котле не упадет до значения, которое соответствует точке пересечения с линией равновесия. После пересечения линии вектор сил, действующих на грибок, меняет направление, и грибок устремляется к седлу. Таким образом, замкнутая линия образует статическую характеристику ПК, а образованный прямоугольник составляет петлю гистерезиса по давлению.

Размер петли гистерезиса по давлению Δp_r определяется разницей значений давления в точках, в которых грибок, с одной стороны, устремляется вверх к упорам и, с другой, устремляется вниз к седлу, т.е. $\Delta p_r = p_{k0} - p_c = 1,7 - 1,48 = 0,22$ бар.

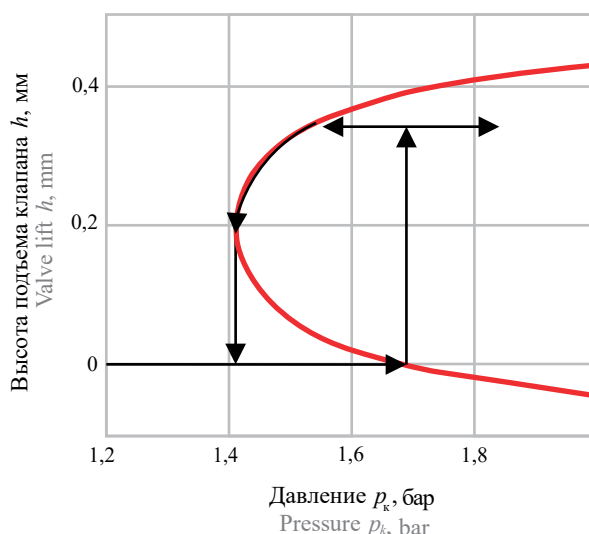


Рис. 15. Статическая характеристика грузового ПК типа КПС-07, $k_1 = 0,7$, $k_n = 0$ и $k_2 = 0$

Fig. 15. Static characteristic of load SV of KPS-07 type, $k_1 = 0,7$, $k_s = 0$ and $k_2 = 0$

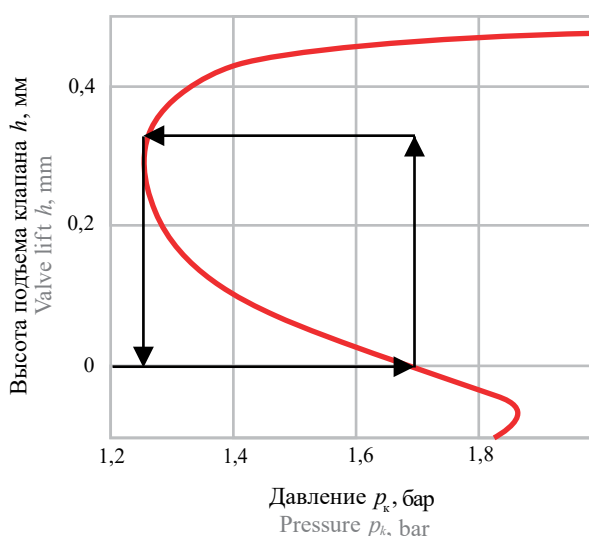


Рис. 16. Статическая характеристика грузового ПК с отбортовкой при $k_1 = \text{var}$, $k_n = 0$ и $k_2 = 0,7$

Fig. 16. Static characteristic of load SV with flanging, at $k_1 = \text{var}$, $k_s = 0$ and $k_2 = 0,7$

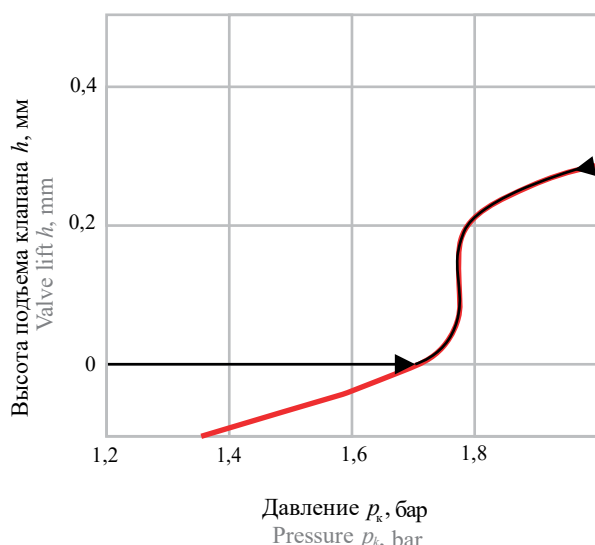


Рис. 18. Статическая характеристика пружинного ПК при $k_1 = \text{var}$, $k_n = 5600$ Н/м и $k_2 = 0$

Fig. 18. Static characteristic of spring SV, at $k_1 = \text{var}$, $k_s = 5,600$ N/m and $k_2 = 0$

Статическая характеристика ПК при $k_1 = 0,7$, $k_2 = 0$ и $k_n = 0$ приведена на рис. 15, на которой показано влияние конусности места посадки грибка с $\varphi = 45^\circ$. Исходные данные типичны для ПК типа КПС — 0,7. Видно, что в сравнении с характеристикой при $k_1 = \text{var}$ петля гистерезиса больше, $\Delta p_r = 0,28$ бар.

Статическая характеристика ПК при $k_1 = \text{var}$, $k_2 = 0,7$ и $k_n = 0$ (рис. 16). Расчет отражает влияние отбортовки на грирке. Влияние этого конструктивного элемента заметно сильнее влияния угла конусности. В этом случае размах петли гистерезиса достигает 0,45 бар.

Статическая характеристика пружинных ПК при $k_1 = \text{var}$, $k_2 = 0$ и $k_n = 2800$ Н/м (рис. 17) и $k_n = 5600$ (рис. 18). На этих статических характеристиках в состав петли гистерезиса входит устойчивый участок линии равновесия. Видно, что наличие поджимающей пружины заметно уменьшает петлю гистерезиса, а при определенных значениях жесткости пружины можно добиться ее исключения. Для оценки достоверности результатов расчета (рис. 17) можно сравнить их с результатом испытаний клапана «Сержант» (рис. 7).

Статическая характеристика ПК при $k_1 = \text{var}$, $k_2 = 0,7$ и $k_n = 4000$ Н/м приведена на рис. 19. В расчете демонстрируется комбинированное влияние отбортовки и пружины. Видно, что размер петли гистерезиса можно задать и рассчитать.

Подобие предохранительных клапанов

Встает вопрос, на самом ли деле ПК с различными геометрическими и иными параметрами могут иметь одинаковую статическую характеристику в безразмерных координатах, как показано

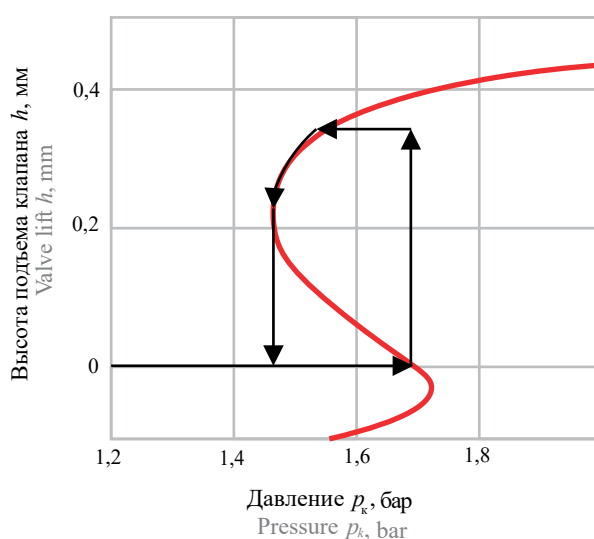


Рис. 19. Статическая характеристика пружинного ПК при $k_1 = \text{var}$, $k_n = 5600$ Н/м и $k_2 = 0,7$

Fig. 19. Static characteristic of spring SV, at $k_1 = \text{var}$, $k_s = 5,600$ N/m and $k_2 = 0,7$

фирмой *Emerson* (рис. 1)? Такие ПК можно назвать подобными. Для решения вопроса обратимся к (14).

Перенесем влево член p_a , затем разделим обе части уравнения на $(p_{k0} - p_a)$:

$$\frac{p_k - p_a}{p_{k0} - p_a} = \frac{4k_n h^*}{(p_{k0} - p_a) \pi d \sqrt{1 - k^2}} \cdot (18)$$

$$p_{k0} - p_a \quad 28,8(0,25 - h^*)h^{*2} + 7,2h^{*2} + 1$$

Используем обозначение, подобное приведенному на рис. 1:

$$\delta = \frac{p_k - p_a}{p_{k0} - p_a}. \quad (19)$$

И обозначим безразмерный комплекс через K , т.е.:

$$K = \frac{k_n}{(p_{k0} - p_a)d}. \quad (20)$$

Получим зависимость в безразмерных координатах

$$\delta = f(k, h^*, K) \quad (21)$$

или в другой форме

$$h^* = F(\delta, k, K). \quad (22)$$

Если проточные части у разных ПК геометрически подобны, т.е. $k_1, k_2 = \text{idem}$, и, если упругость пружины подобрана таким образом, что и $K = \text{idem}$, то статические характеристики в безразмерных координатах у ПК можно ожидать одинаковыми. Из этого следует, что весь каталог ПК, предложенный фирмой *Emerson*, должен удовлетворять (21)

или (22). В противном случае характеристика, данная на рис. 1, не является общей для приведенного каталога клапанов.

Выводы

1. Гистерезис по давлению у ПК при их срабатывании давно известен по результатам испытаний. Ввиду его влияния на качество регулирования давления в защищаемом объеме и на энергопотери размер его петли нормативно ограничен в России и за рубежом.
2. Экспериментально выяснены факторы, влияющие на размер петли гистерезиса, а также причины проявления этого эффекта. Существующие графоаналитические и численные варианты описания процессов, приводящих к появлению гистерезиса, не обладают общностью и достаточно громоздки при попытках их использования на практике.
3. Поставленная задача описания петли гистерезиса решена аналитически в плоском варианте и некоторых других упрощениях. Решение представлено в сравнительно простом виде. Оно основано на описании взаимодействия газодинамического потока и грибка клапана, веса груза и пружины. Составлено уравнение баланса сил, действующих на подвижные части клапана, выделены участки линии равновесия, в которых исследована устойчивость положения. По устойчивым участкам построены статические характеристики ПК, выражающие зависимость высоты подъема грибка клапана от давления в защищаемом объеме, и петля гистерезиса.
4. Выявлено, что грузовым ПК органически присущ гистерезис, а способов его исключения нет. Влияние проточной части клапан, включающей патрубок и седло, весьма ограничено. Наибольший вклад в размер петли вносит отбортовка грибка.
5. Петля гистерезиса у пружинных ПК регулируется жесткостью пружины, чем жестче пружина, тем меньше размер петли. В принципе, петля может быть полностью исключена.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вейнберг Я.И. Паровые котлы. Причины взрывов паровиков. Меры к их предупреждению. М. : Тип. Потапова, 1888. 393 с.
2. Кондратьева Т.Ф. Предохранительные клапаны (2-е изд., перераб. и доп.). Л. : Машиностроение, 1976. 230 с.
3. Gastberg A., Richter A. Betriebsverhalten von Sicherheitsventilen mit konstantem Fremdgedrueck. ARI-Armaturen GmbH & Co., KG. April 2015. URL: www.ari-armaturen.com
4. Greenwood A. Tyco pressure relief valve engineering handbook, Crosby and Varel Products. Preliminary Edition, March 2012. Fire Science Centre, University of New Brunswick, P.O. Box 4400, Fredericton, N.B. E3B 5A3 Canada.
5. Кондратьева Т.Ф., Исаков В.П., Петрова Ф.П. Динамическая устойчивость работы предохранительного клапана // Химическое и нефтяное машиностроение. 1978. № 12. С. 14–17.
6. Dannenmaier T., Schmidt J., Denecke J., Odenwald O. European program on evaluation of safety valve stability. Engineering // Chemical Engineering Transactions. 2016. Vol. 48. Pp. 625–630. DOI: 10.3303/CET1648105
7. Hős C.J., Champneys A.R., Paul K., McNeely M. Dynamic behaviour of direct spring loaded pressure relief valves connected to inlet piping: IV review and recommendations // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. Vol. 48. Pp. 270–288. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.04.005
8. Aldeeb A.A., Darby R., Arndt S. The dynamic response of pressure relief valves in vapor or gas service. Part II: Experimental investigation // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014. Vol. 31. Pp. 127–132. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.06.002
9. Borg A., Jakobsson S. On the stability of pressure relief valve a numerical study using CFD department of chemical and biological engineering division of chemical engineering. Gothenburg, Sweden. 2014.
10. Стадник М.И., Шаргородський С.А., Руткевич В.С. Забезпечення постійного гістерезису золотникових запобіжних клапанів прямої дії // Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № 4 (111). С. 100–107. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-11
11. Berro H., Moussou P. Electricité de France research and development analysis in mechanics and acoustics dept mechanisms of instability of safety relief valves in water systems // 10th International Conference on Flow-Induced Vibration Trinity College, Dublin, Ireland July 5th 2012.
12. Плюгин Б.С. Исследование процесса закрытия пневматического тарельчатого клапана и путей снижения скорости посадки запорного органа на седло : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1978. 16 с.

13. Лубенец В.Д., Романенко Н.Т., Никитин Ю.Ф. и др. Определение времени открытия электропневматических клапанов // Компрессорные и вакуумные машины и пневмоагрегаты : тр. МВТУ. 1971. № 146. С. 56–58.
14. Zong C., Zheng F., Qingye Li, Song X. Experimental analysis of the lift break of a spring loaded relief valve operating in pneumatic mode // Journal of Pressure Vessel Technology. 2020. Vol. 142. Issue 6. DOI: 10.1115/1.4047245
15. Макарьянц Г.М., Свербилов В.Я., Макарьянц М.В., Батракова О.В. Расчет подъемной силы газового потока в плоском предохранительном клапане с использованием численных методов // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 4. С. 247–251.
16. Свербилов В.Я., Макарьянц Г.М., Макарьянц М.В., Стадник Д.М. Аналитическая модель автоколебаний плоского предохранительного клапана // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 12 (4-1). С. 252–256. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschyot-podyomnoy-sily-gazovogo-potoka-v-ploskom-predohranitelnom-klapane-s-ispolzovaniem-chislennyh-metodov>
17. Gastberg A., Richter A. Betriebsverhalten von Sicherheitsventilen mit konstantem Fremdgedruck. ARI-Armaturen GmbH & Co. KG, 2015. URL: www.ari-armaturen.com
18. Zahariev T. Berechnung der Durchströmung und der Kennwerte von Sicherheitsventilen : Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur. Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der Otto-von-Querike-Universität Magdeburg, m 15.11.2001.
19. Рочек У. Быстроподъемные предохранительные клапаны. Л. : ЦКБА, 1968. 13 с.
20. Поландов Ю.Х. Повышение взрывобезопасности паровых котлов с рабочим давлением до 0,07 МПа в АПК путем инженерно-технических решений : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Орел, 1998. 43 с.

REFERENCES

1. Weinberg Ya.I. *Steam boilers. Causes of explosions of steam engines. Measures to prevent them.* Moscow, Type. Potapova, 1888; 393. (rus).
2. Kondratieva T.F. *Safety valves. 2nd ed., revised and additional.* Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976; 230. (rus).
3. Gastberg A., Richter A. *Betriebsverhalten von Sicherheitsventilen mit konstantem Fremdgedruck.* ARI-Armaturen GmbH & Co. KG, 2015. URL: www.ari-armaturen.com
4. Greenwood A. *Tyco pressure relief valve engineering handbook. Crosby and Varec Products.* Preliminary Edition. 2012. Fire Science Centre, University of New Brunswick, P.O. Box 4400, Fredericton, N.B. E3B 5A3 Canada.
5. Kondratieva T.F., Isakov V.P., Petrova F.P. Dynamic stability of the safety valve operation. *Chemical and oil engineering.* 1978; 12:14-17. (rus).
6. Dannenmaier T., Schmidt J., Denecke J., Odenwald O. European program on evaluation of safety valve stability. *Engineering. Chemical Engineering Transactions.* 2016; 48:625-630. DOI: 10.3303/CET1648105
7. Hős C.J., Champneys A.R., Paul K., McNeely M. Dynamic behavior of direct spring loaded pressure relief valves connected to inlet piping: IV review and recommendations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2017; 48:270-288. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.04.005
8. Aldeeb A.A., Darby R., Arndt S. The dynamic response of pressure relief valves in vapor or gas service. Part II: Experimental investigation. September. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2014; 31:127-132. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.06.002
9. Borg A., Jakobsson S. *On the stability of pressure relief valve. A numerical study using CFD* Department of chemical and biological engineering division of chemical engineering. Gothenburg, Sweden. 2014.
10. Stadnik M.I., Shargorodsky S.A., Rutkevich V.S. *Safeguarding the constant hysteresis of spool valves in the straight line.* 2020; 4(111):100-107. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-11 (ukr).
11. Berro H., Moussou P. Electricité de France research and development analysis in mechanics and acoustics dept mechanisms of instability of safety relief valves in water systems. *10th International Conference on Flow-Induced Vibration Trinity College, Dublin, Ireland July 5th 2012.*
12. Plugin B.S. *Study of the process of closing a pneumatic poppet valve and ways to reduce the speed of landing of the shut-off body on the saddle : abstract of the dissertation of the Candidate of technical sciences.* Moscow, 1978; 16. (rus).
13. Lubenets V.D., Romanenko N.T., Nikitin Yu.F. et al. Determination of the opening time of electro-pneumatic valves. *Compressor and vacuum machines and pneumatic units : tr. MVTU.* 1971; 146:56-58. (rus).
14. Zong C., Zheng F., Qingye Li, Song X. Experimental analysis of the lift break of a spring loaded relief valve operating in pneumatic mode. *Journal of Pressure Vessel Technology.* 2020; 142(6). DOI: 10.1115/1.4047245
15. Makaryants G.M., Sverbilov V.Ya., Makaryants M.V., Batrakova O.V. Calculation of the lifting force of a gas flow in a flat safety valve using numerical methods. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2010; 12(4):247-251. (rus).

16. Sverbilov V.Ya., Makaryants G.M., Makaryants M.V., Stadnik D.M. Analytical model of self-oscillations of a flat safety valve. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010; 12(4):252-256. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschyot-podyomnoy-sily-gazovogo-potoka-v-ploskom-predohranitelnom-klapane-s-ispolzovaniem-chislennyh-metodov> (rus).
17. Gastberg A., Richter A. *Betriebsverhalten von Sicherheitsventilen mit konstantem Fremdgedruck*. ARI-Armaturen GmbH & Co. kg. 2015. URL: www.ari-armaturen.com
18. Zahariev T. *Berechnung der Durchströmung und der Kennwerte von Sicherheitsventilen : Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur. Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der Otto-von Guericke-Universität Magdeburg*, m 15.11.2001. (ger).
19. Rocek J. Schnellschub — Sicherheitsventil. *Technische Information Armaturen*. 1967; 2:23-26. (ger).
20. Polandov Yu.Kh. *Improving the explosion safety of steam boilers with a working pressure of up to 0.07 MPa in the agro-industrial complex by engineering solutions : abstract of the dissertation of the Candidate of technical sciences*. Eagle, 1998; 43. (rus).

Поступила 25.11.2022, после доработки 02.06.2023;

принята к публикации 20.06.2023

Received November 25, 2022; Received in revised form June 2, 2023;

Accepted June 20, 2023

Информация об авторе

ПОЛАНДОВ Юрий Христович, д-р техн. наук, профессор, профессор-консультант кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; Scopus AuthorID: 55538573200; ORCID: 0000-0003-2983-6023; e-mail: polandov@yandex.ru

Information about the author

Yurii Kh. POLANDOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor-Consultant of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus AuthorID: 55538573200; ORCID: 0000-0003-2983-6023; e-mail: polandov@yandex.ru

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 4. С. 31–41

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(4):31-41

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ/REVIEW-ANALYTICA PAPER

УДК 614.841.12

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.04.31-41>

Особенности поведения резервуаров со сжиженным природным газом (СПГ) в очаге пожара

Юрий Николаевич Шебеко ✉

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведено обоснование важности исследований поведения резервуаров с СПГ в очаге пожара. Отмечен наиболее опасный режим разрушения таких резервуаров — BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion — взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости). Актуальность статьи обусловлена необходимостью анализа явления BLEVE с целью его предотвращения и снижения последствий. Целью работы является изложение основ феноменологии этого явления и анализ современных исследований в указанном направлении, включая анализ имевших место инцидентов. При этом основное внимание уделяется сжиженному природному газу.

Общие закономерности возникновения и протекания BLEVE. На основе анализа p – V и p – T диаграмм (p — давление; V — объем; T — температура) рассмотрена феноменология явления BLEVE. Отмечено наличие предельной температуры перегрева жидкой фазы, выше которой ее кипение происходит в режиме гомогенной нуклеации с дальнейшим возникновением BLEVE.

Краткий анализ аварий с возникновением BLEVE на резервуарах СПГ. Рассмотрены имевшие место наиболее крупные аварии с взрывом резервуаров СПГ в очаге пожара. В их числе проанализированы инциденты в г. Тивисса (Испания, 2002 г.), г. Зарзалико (Испания, 2011 г.) и провинции Шанси (Китайская народная республика, 2019 г.) на автоцистернах для перевозки СПГ. Отмечено, что размеры зон поражения опасными факторами таких аварий (тепловое излучение огненных шаров, давление в ударной волне, разлетающиеся фрагменты резервуаров) могут достигать величин 100–200 м.

Экспериментальные и теоретические исследования явления BLEVE и образующихся при этом огненных шаров. Проанализированы исследования, в которых изучены параметры огненного шара (диаметр, длительность существования, высота подъема, интенсивность теплового излучения) на резервуарах СПГ объемом до 5 м³. Отмечено также крупномасштабное исследование параметров огненного шара, образующегося в результате истечения СПГ из трубопровода и сгорания образующегося переобогащенного облака.

Выводы. Основные закономерности аварий на резервуарах СПГ, протекающих в режиме BLEVE с образованием огненных шаров, во многом аналогичны имеющим место в случае резервуаров со сжиженными углеводородными газами (СУГ), но при этом поверхностная плотность теплового потока огненного шара СПГ (около 500 кВт/м²) существенно выше, чем для СУГ.

Ключевые слова: перегретая жидкость; предельная температура перегрева; взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости; огненный шар; зоны поражения опасными факторами

Для цитирования: Шебеко Ю.Н. Особенности поведения резервуаров со сжиженным природным газом (СПГ) в очаге пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 31–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.31-41

✉ Шебеко Юрий Николаевич, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Behavior of liquefied natural gas tanks in a point of fire origin

Yury N. Shebeko ✉

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper substantiates the importance of investigations of LNG tanks behaviour during fires. The most dangerous mode of their destruction (BLEVE, boiling liquid expanding vapour explosion), is mentioned. The relevance of the article is conditioned by the need to analyze the BLEVE phenomenon to prevent it and to mitigate its consequences. The purpose of the paper is to present fundamentals of this phenomenon and to analyze advanced relevant research findings, including the analysis of recent accidents. The main focus is on liquefied natural gas.

General regularities of BLEVE. The BLEVE phenomenon was analyzed using p – V and p – T diagrams (p is pressure, V is volume, and T is temperature). Liquid boils at critical overheat temperature in the mode of homogeneous nucle-

ation followed by BLEVE. Experimental data on critical overheat temperatures are presented for some liquefied gases and flammable liquids.

Brief analysis of BLEVE accidents involving LNG tanks. Major BLEVE accidents, involving LNG tanks, are considered. These events occurred in Tivissa (Spain, 2002), Zarzalico (Spain, 2011), and Shansi (China, 2019), and each involved road tanks for LNG transportation. Dimensions of hazardous thermal radiation zones, that emerged as a consequence of fireballs, blast waves and vessel fragments, reached 100–200 m.

Experimental and theoretical investigations of BLEVE and fireballs that emerged at LNG tanks. The most interesting experimental studies in this area are analyzed. Hazardous factors (the fireball diameter, time frame, height of elevation, and thermal radiation intensity) were determined using a 5 m³ tank. The empirical correlation, connecting the above mentioned parameters with the LNG mass in the tank, were obtained. Large-scale experiments were carried out to determine characteristics of fireballs that emerged when LNG was flowing out of the pipeline and when the resulting oversaturated cloud was on fire.

Conclusions. The main patterns of BLEVE and fireball accidents, involving LNG tanks, were analyzed. Their patterns are similar to those typical for LPG tanks. However, the surface radiation from LNG tank fireballs (nearly 500 kW/m²) is much higher than the surface radiation from LPG tanks (nearly 350 kW/m²).

Keywords: overheated liquid; critical overheating temperature; boiling liquid expanding vapour explosion; fireball; hazardous zones

For citation: Shebeko Yu.N. Behavior of liquefied natural gas tanks in a point of fire origin. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4):31–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.31-41 (rus).

✉ Yury Nikolaevich Shebeko, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Введение

При попадании резервуара с жидкостью или сжиженным газом в очаг пожара возможен взрыв паров вскипающей жидкой фазы хранящегося продукта. Такое явление названо в литературе BLEVE — boiling liquid expanding vapor explosion [1, 2]. Если содержимое резервуара является горючим веществом, то в результате BLEVE образуется огненный шар — крупномасштабное диффузионное пламя с интенсивным тепловым излучением. Кроме того, взрыв резервуара сопровождается возникновением ударных волн и разлетом фрагментов оболочки резервуара (например, инциденты в Фейсене (Франция, 1966 г., Мехико (Мексика, 1984 г.)) [1, 2], Алма-Ате (Казахстан, 1989 г.) [3], а также аварии, описанные в работах [4–6]). Следует отметить, что инциденты [4–6] имели место на резервуарах со сжиженным природным газом (СПГ), опасность которых в недалеком прошлом недооценивалась. Разрушительные последствия явления BLEVE с образованием огненных шаров вызвали интерес к нему со стороны специалистов разных стран. В результате проведенных исследований выявлены особенности возникновения и протекания аварий в режиме BLEVE. Настоящая работа посвящена изложению основ феноменологии этого явления и анализу современных исследований в указанном направлении, включая анализ имевших место инцидентов. При этом основное внимание уделяется сжиженному природному газу.

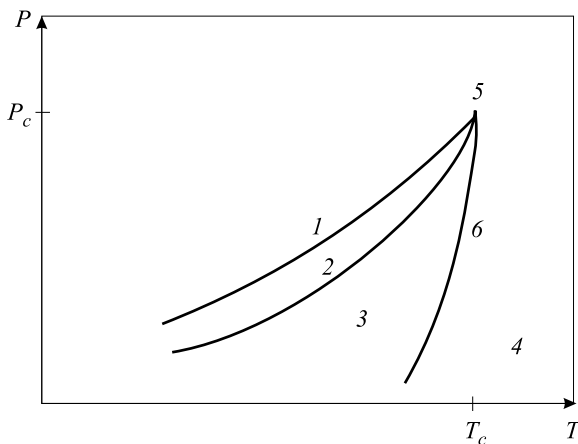
Общие закономерности возникновения и протекания BLEVE

Нагрев замкнутого сосуда с жидкостью или сжиженным газом (далее по тексту — жидкостью) приводит к повышению температуры последней до значений, существенно превышающих нор-

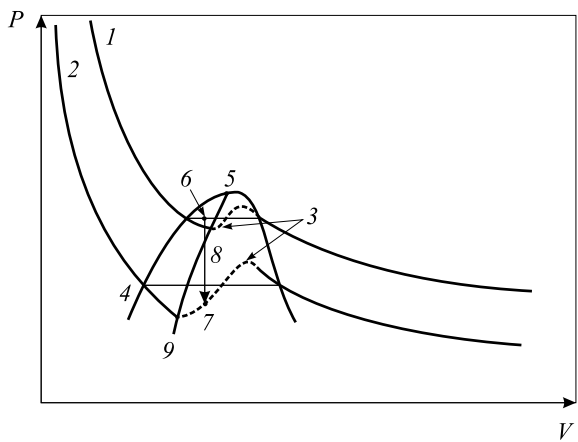
мальную температуру кипения с соответствующим возрастанием давления насыщенных паров. Вследствие нагрева несмоченных стенок снижается предел прочности их материала, в результате чего может произойти разгерметизация резервуара. Реализующее при этом внезапное резкое снижение давления вызывает распространяющуюся вглубь жидкости волну разрежения, за которой следует волна вскипания, дающая начало быстрому росту давления до величины, превышающей предельно допустимое для резервуара давление. Процесс разрушения резервуара ускоряется и переходит во взрывной режим, вызывая ударные волны в окружающем пространстве, огненный шар с интенсивным тепловым излучением и разлетающиеся фрагменты резервуара [1, 2, 7–9].

Для понимания процесса возникновения BLEVE, следуя [10–12], рассмотрим особенности вскипания перегретых жидкостей. В отсутствии центров инициирования испарения жидкость может нагреваться до температур, существенно превышающих нормальную температуру кипения, но не выше определенного предела, называемого пределом перегрева. Как показывают экспериментальные данные, предел перегрева не более чем на 10 % ниже критической температуры жидкости. Геометрическое место точек на p – V диаграмме состояния, отвечающих условию $(dp/dV)_T = 0$, называется спиноподальной кривой. Типичная диаграмма состояния в координатах p – T и p – V приведена на рисунке. Как показывают данные [10–12], пределы перегрева близки к значениям, соответствующим спиноподальной кривой.

За волной разрежения давление близко к атмосферному, а температура значительно превышает нормальную температуру кипения. В результате внутри жидкости, если ее температура выше пре-



a



b

Типичные диаграммы состояния систем *жидкость – пар* (p_c и T_c — критические давление и температура): *a* — диаграмма p – T (1 — стабильная жидкость; 2 — метастабильный пар; 3 — метастабильная жидкость; 4 — стабильный пар; 5 — критическое состояние; 6 — спинодальная кривая); *b* — диаграмма p – V (1 — изотерма начального состояния; 2 — изотерма конечного состояния; 3 — участки изотерм Ван-дер-Ваальса, отвечающие метастабильным состояниям вещества; 4 — линия, ограничивающая область существования двухфазной среды; 5 — критическое состояние; 6 — начальное состояние; 7 — конечное состояние; 8 — линия перехода из начального состояния в конечное; 9 — спинодальная кривая)

Standard diagrams of *liquid – vapour* systems (p_c and T_c are critical pressure and temperature): *a* — p – T diagram (1 is stable liquid; 2 is metastable vapour; 3 is metastable liquid; 4 is stable vapour; 5 is critical state; 6 is a spinodal curve); *b* is the p – V diagram (1 is the isotherm of the initial state; 2 is the isotherm of the final state; 3 are parts of Van der Waals isotherms responding to metastable states of a substance; 4 is the line restricting the area of the two-phase medium; 5 is the critical state; 6 is the initial state; 7 is the final state; 8 is the line of transition from the initial to the final state; 9 is the spinodal curve)

дела перегрева, возникают ядра гомогенной нуклеации с дальнейшим быстрым вскипанием жидкости и образованием ударной волны, приводящей к взрывному разрушению резервуара и выбросу его содержимого в атмосферу. Если процесс разрушения резервуара инициирован нагревом от очага пожара, то образуется огненный шар (табл. 1).

Таблица 1. Экспериментальные значения предельных температур перегрева жидкостей

Table 1. Experimental values of limiting superheating temperatures of liquids

Вещество Substance	Предельная температура перегрева, К Ultimate superheating temperature, K
Метан Methane	26–30
Пропан Propane	326
н-Бутан n-Butane	362
н-Пентан n-Pentane	421
Изопентан Isopentane	412
Диэтиловый эфир Diethyl ether	420
Аммиак Ammonia	347
Хлор Chlorine	247

Краткий анализ аварий с возникновением BLEVE на резервуарах СПГ

В литературе большое число публикаций посвящено анализу аварий с возникновением BLEVE и образованию огненных шаров на резервуарах сжиженных углеводородных газов (СУГ). В то же время количество подобных аварий на резервуарах СПГ существенно более низкое, что связано, вероятно, со значительно меньшим количеством эксплуатируемых резервуаров такого вида. При этом указанные аварии как в случае СУГ, так и в случае СПГ имели место в основном для транспортных резервуаров. В настоящем разделе статьи проанализированы наиболее крупные из таких аварий на резервуарах СПГ [4–6].

Инцидент со взрывом резервуара СПГ на АЦ при воздействии очага пожара произошел 22.06.2002 г. вблизи г. Тивисса (Испания, провинция Каталония) [4]. Автоцистерна, перевозившая СПГ, перевернулась из-за превышения допустимой скорости. Возник факел пламени, под воздействием которого загорелись шины автомобиля. Через 2 мин размеры пламени значительно возросли (вероятно, за счет истечения продукта из предохранительных клапанов). Через 20 мин после начала аварии резервуар СПГ взорвался с образованием огненного шара. Погиб водитель автоцистерны, 2 человека на расстоянии 200 м от места аварии получили ожоги.

Резервуар СПГ имел диаметр 2,33 м и длину 13,5 м и был изготовлен из нержавеющей стали. Оболочка резервуара имела толщину 4 мм (днище —

6 мм). Теплоизоляция резервуара из пенополистирола и с покрытием из алюминия. Объем автоцистерны 56 м³, рабочее давление 0,7 МПа. Резервуар содержал 47,6 м³ продукта. Имелось 5 предохранительных клапанов различного диаметра.

Имели место два взрыва: первый, относительно слабый, связанный с возникновением трещины в месте перегрева оболочки резервуара, и второй, связанный с его катастрофическим разрушением. Резервуар разрушился с образованием нескольких фрагментов. В здании на расстоянии 125 м от места аварии разрушения остекления не наблюдалось, т.е. давление в ударной волне не превышало 0,3 кПа. Среди фрагментов наибольший имел длину 5 м и улетел на расстояние 80 м. Другой фрагмент длиной 4 м улетел на расстояние 125 м и попал в здание. Мотор и кабина водителя перенеслись на расстояние 257 м. Некоторые фрагменты были найдены на расстоянии до 1000 м от места аварии. В автоцистерне находилось около 19 тонн СПГ. Исходя из этого, оценки диаметра огненного шара дали величину 150 м, высота подъема — 113 м, длительность — 12 с.

В октябре 2011 г. вблизи г. Зарзалико (Испания, провинция Мурсия) произошла авария с автоцистерной, содержащей 19,6 тонн СПГ [5]. Отмечено, что аварии с такого рода цистернами нередки. Так, за последние 15 лет в Испании имели место 15 инцидентов, в 7 из которых произошло их переворачивание. Авария началась со столкновения автоцистерны с неподвижным автомобилем, груженым бетонными конструкциями. Возник пожар, приведший к гибели водителя автоцистерны. Прибывшие пожарные организовали зону безопасности радиусом 60 м, при этом пожарный автомобиль расположили на расстоянии 150 м от места пожара. Все люди из зоны безопасности были эвакуированы. В определенный момент в зоне пожара возник сильный шум, связанный с горением СПГ, и пожарный автомобиль на расстоянии 200 м. Через примерно 40 с после этого резервуар автоцистерны взорвался.

Автоцистерна имела следующие характеристики:

- длина — 14,04 м;
- внутренний диаметр — 2,34 м;
- объем — 56,5 м³;
- максимальная масса СПГ — 21 000 кг;
- максимально допустимое давление — 0,7 МПа;
- материал оболочки — нержавеющая сталь;
- толщина стенок оболочки — 4 мм (днища — 6 мм);
- тепловая изоляция — пенополиуретан, покрытый алюминиевым листом толщиной 2 мм;
- наличие 3 предохранительных клапанов (2 — на давление 0,7 МПа и 1 — на давление 0,91 МПа).

Столкновение автомобилей произошло в 8:20, после чего начался пожар с черным дымом (горели

шины, дизельное топливо и/или пенополиуретановая теплоизоляция). В 8:35 масштаб и внешний вид очага пожара существенно изменились — появилось более яркое пламя и дым стал менее черным, что, вероятно, было связано с горением СПГ. В 8:40 прибыли пожарные, и в этот момент уже вся автоцистерна была охвачена пламенем. В 9:32 произошел взрыв резервуара. Длительность существования образовавшегося огненного шара, по показаниям свидетелей, составила около 10 с.

Последствия инцидента были зафиксированы на расстоянии до 200 м от места аварии. На расстоянии до 50 м растительность выгорела, на расстоянии 90 м наблюдали пиролиз сосновых иголок, листья деревьев высохли. По расчетным оценкам это соответствует интенсивности теплового излучения 55 кВт/м² в течение 10 с. На близлежащей АЗС, расположенной на расстоянии 125 м, из оконных проемов вылетели стеклопакеты, что соответствует давлению в ударной волне 2–3 кПа. Резервуар развалился на 3 основных фрагмента, локализованных вблизи места аварии, и множество более мелких, которые были найдены в радиусе 200 м. На основании оценок интенсивности теплового излучения 55 кВт/м² на расстоянии 90 м и длительности огненного шара 10 с было найдено, что огненный шар имел диаметр 133 м.

На основании результатов расследования аварии сделаны следующие выводы. Столкновение автоцистерны с автомобилем с дальнейшим горением пенополиуретановой тепловой изоляции обусловило начало теплового воздействия на резервуар СПГ. Поэтому в будущем следует отказаться от использования такого вида автоцистерн в пользу автоцистерн с вакуумной тепловой изоляцией. Даже при эффективной работе предохранительных клапанов нагрев несмоченной стенки резервуара может привести к ее нагреву до недопустимых температур с дальнейшим разрушением. Оценки воздействия теплового излучения огненного шара на окружающие объекты показали, что доза излучения на расстоянии 170 м отвечает летальности для незащищенного человека с вероятностью 1 % и ожогу 1-й степени на расстоянии 295 м. Ударная волна может вызвать заметные разрушения зданий на расстоянии 125 м, фрагменты резервуара могут разлетаться на расстояния до 200 м. В аварии погиб только 1 человек (водитель автоцистерны) благодаря своевременной эвакуацией людей в безопасную зону.

В работе [6] проанализирована авария на автоцистерне для перевозки СПГ, произошедшая 23.04.2019 г. в провинции Шанси (Китайская Народная Республика). Инцидент имел место на стоянке автомобилей. В результате пожара произошел разрыв резервуара СПГ с образованием огненного шара с повреждением

Таблица 2. Теоретические оценки параметров огненного шара**Table 2.** Theoretically evaluated fireball parameters

Параметр огненного шара Fireball parameter	Величина параметра Parameter value	
	наблюдение observation	расчет calculation
Максимальный диаметр, м Maximum diameter, m	170	157,7
Максимальная высота, м Maximum height, m	250	235,4
Время существования, с Time of existence, s	10,8	10,7

окружающих объектов. В ликвидации пожара участвовали 120 пожарных с использованием 21 пожарного автомобиля. В резервуаре содержалось 22 680 кг СПГ при давлении 0,483 МПа. Автоцистерна имела длину 16,2 м и диаметр резервуара 2,6 м. Авария с разрывом резервуара была инициирована пожаром соседней автоцистерны для перевозки н-пентана в результате ошибочных действий персонала. Представлена киносъемка возникновения и развития огненного шара, заснятая камерой, расположенной на соседнем объекте, с расстояния 1220 м. На ее основе определены такие параметры, как максимальный диаметр огненного шара, максимальная высота его центра и время существования (табл. 2). Проведены также теоретические оценки указанных параметров. Результаты приведены ниже.

Предложены мероприятия по предотвращению такого рода аварий.

Экспериментальные и теоретические исследования BLEVE и огненных шаров на резервуарах СПГ

Исследованию явления BLEVE посвящен целый ряд работ (см., например, [13–24]). Однако эти работы не касаются случая резервуаров с СПГ. Поэтому ниже мы рассмотрим исследования, посвященные резервуарам СПГ, и кратко коснемся резервуаров со сжиженным водородом, являющимся, наряду со сжиженным природным газом, перспективным видом топлива.

В работе [25] представлены результаты оценки параметров огненного шара (радиуса, высоты, времени существования) на резервуарах СПГ при реализации BLEVE. Отмечено, что до четверти энергии, выделяющейся при горении, переходит в тепловое излучение. На основе анализа литературных данных выявлены 3 стадии эволюции огненного шара:

1) рост диаметра в течение 2 с, вначале до половины максимального диаметра с бело-желтым пламенем. Затем происходит рост диаметра до максимального значения. При этом приблизительно 10 %

поверхности является темной за счет образующейся сажи, остальная поверхность белая, желто-оранжевая или красная;

2) стационарное горение (длительность около 10 с). Вначале пламя имеет приблизительно сферическую форму, которая переходит в грибовидную;

3) догорание, продолжающееся приблизительно в течение 5 с, за это время пламя практически не меняет своего размера.

На основе расчетных формул, представленных в «желтой» книге TNO [26], вычислены указанные выше параметры огненного шара. Для резервуаров, содержащих 9500–19 000 кг СПГ, найдено, что при допустимой плотности теплового потока 5 кВт/м² (предельно допустимая величина для воздействия на человека) безопасное расстояние должно быть не менее 400 м.

В работе [27] описан эксперимент по определению параметров огненного шара при возникновении BLEVE на резервуарах СПГ объемом 5 м³. Проведено 4 опыта на одностенных резервуарах при искусственном инициировании их разрушения с помощью взрывчатых веществ. Условия эксперимента приведены в табл. 3.

Базовым считался эксперимент № 4, в котором ожидали возникновения огненного шара с максимальным поражающим воздействием. При этом эксперимент № 1 должен был моделировать инцидент с топливным баком автомобиля. Этот эксперимент был не вполне удачным вследствие частичного разрушения резервуара, в результате чего получено вытянутое, а не полусферическое пароаэрозольное облако. При формулировке выводов по работе авторы [15] не учитывали этот эксперимент.

На основании полученных экспериментальных данных сделаны следующие выводы.

1. Измеренный диаметр огненного шара был несколько меньше, чем для эквивалентной массы СУГ (данные по СУГ из работы [28]). Предложена следующая корреляция для диаметра D , м, огненного шара:

$$D = a \cdot M^b, \quad (1)$$

где M — масса продукта, вовлеченного в огненный шар, кг;

a, b — коэффициенты, равные 4,8 и 0,333 соответственно.

Согласно [28] для СУГ имеет место аналогичная формула, но коэффициент a составляет 5,8. С учетом возможной погрешности в определении диаметра огненного шара данное различие можно считать небольшим.

2. Время существования огненного шара находится в интервале $(0,45–0,90)M^{0,333}$, что близко к данным [28] для СУГ.

Таблица 3. Условия проведения экспериментов на резервуарах СПГ
Table 3. Initial conditions at LNG tanks

Номер Number	Объем резервуара, м ³ Tank volume, m ³	Начальное давление в резервуаре, МПа (избыточное) Initial pressure in a tank, MPa (overpressure)	Начальная температура СПГ, °С Initial LNG temperature, °C	Степень заполнения резервуара жидкой фазой, % Extent of tank filling by the liquid phase, %	Масса СПГ в резервуаре, кг LNG mass in a tank, kg
1	0,935	1,292	–120	66	247
2	5,055	1,301	–115	37	681
3	5,055	0,607	–131	67	1306
4	5,055	1,362	–115	69	1251

3. Максимальная высота подъема центра огненного шара составляет $(1,0–1,2)D$, что близко к случаю СУГ.

4. Поверхностная плотность теплового излучения SEP в опытах № 2 и 4 (высокое начальное давление продукта) составила около 500 и 300 кВт/м² (низкое давление продукта в опыте № 3). Для опытов № 2 и 4 SEP была существенно выше, чем для СУГ. Авторы объясняют различие данных экспериментов № 2 и 4, с одной стороны, и опыта № 3, с другой, тем обстоятельством, что в опыте № 3 давление в резервуаре при его разрыве существенно ниже, чем в опытах № 2 и 4. Вследствие этого в опыте № 3 при разрыве резервуара турбулентное смешение паров и аэрозоля СПГ с воздухом ниже, поэтому скорость и полнота сгорания также ниже.

5. Интенсивность теплового излучения огненного шара на расстоянии 100 м составила 17–26 кВт/м², что близко к случаю огненного шара СУГ [28].

6. В эксперименте № 3 было обнаружено горение СПГ на поверхности земли, продолжавшееся 4 с. Это говорит о том, что даже в этом случае большая часть продукта была вовлечена в огненный шар. В опытах № 2 и 4 горения СПГ на поверхности земли не было зафиксировано. Причина этого состоит, вероятно, в том, что масса продукта, вовлеченного в огненный шар, зависит от доли f мгновенно испарившейся жидкой фазы при разрушении резервуара [8, 29–31]. Согласно этим работам, если величина f превышает 35 %, то вся масса продукта вовлекается в огненный шар в виде паров и жидкого аэрозоля, капли которого быстро испаряются в адиабатическом режиме. В опытах № 2 и 4 величина f превышала 35 %, в то время как в опыте № 3 значение f составляло 22 %, что согласуется с предложенным в работах [8, 29–31] критерием.

Огненный шар может иметь место не только как результат BLEVE, но и в случае сгорания переобогащенной (концентрация горючего газа выше верхнего концентрационного предела распространения пламени) смеси горючего газа или пара с воздухом. Крупномасштабные эксперименты по изучению

таких огненных шаров выполнены в пустыне Гоби в Китайской Народной Республике [32, 33].

В работе [32] экспериментально изучена опасность огненного шара, образующегося при сгорании облака паров СПГ в результате истечения продукта из трубопровода. Измерены такие параметры, как диаметр огненного шара, высота его подъема, время существования, интенсивность теплового излучения с оценкой его поражающего воздействия. Трубопровод имел диаметр 1422 мм, длину 430 м и располагался на глубине 1,5 м. В трубопровод закачивали 800 м³ СПГ при давлении до 20 МПа. В центре трубопровода имелось щелевое отверстие длиной 0,5 м и шириной 0,01 м для моделирования утечки из щелевого отверстия. Интенсивность теплового излучения измеряли 35 датчиками, расположенными на различных расстояниях от места истечения.

Зажигание газа производили одновременно с началом его выхода из трубопровода. Образовывался огненный шар, центр которого достигал высоты 260–300 м через 5 с после начала истечения газа. Максимальный диаметр огненного шара составлял 400 м, его форма была близка к сферической в промежутке времени от 5 до 20 с. Эффективная температура его поверхности составляла около 2200 °С. Далее огненный шар принимал грибовидную форму, а пламя увеличивало свою яркость. После этого горение продолжалось еще около 30 с. Пламя имело желтый цвет с небольшим количеством черного дыма. В месте расположения трубопровода образовалась щель в земле длиной около 50 м.

Работа [33] представляет собой продолжение исследований [32], посвященных главным образом полумпирической оценке параметров огненного шара. Проанализирован ряд публикаций, посвященных такой оценке для случая углеводородных топлив. Для оценки диаметра огненного шара использовали формулу (1), а для его времени существования t_s — формулу:

$$t_s = c \cdot M^d. \quad (2)$$

Величины a и b по данным различных источников находятся в диапазонах 3,86–6,14 и 0,277–0,333 соответственно. Для коэффициентов c и d имеют место интервалы 0,31–1,10 и 0,097–0,349 соответственно. При этом указанные коэффициенты взаимосвязаны между собой в рамках того или иного исследования.

В работе [34] проведен обзор экспериментов, связанных с горением проливов СПГ. В этой работе описаны в том числе опыты, проведенные Gaz de France по горению переобогащенного газового облака в режиме огненного шара. СПГ проливали в приямок диаметром 1,8 и глубиной 1,7 м. Массовая скорость истечения СПГ составляла 2,6–5,6 кг/с. При зажигании газового облака образовывался огненный шар диаметром 5–30 м с высотой подъема его центра 17–26 м. На расстоянии 20 м от места пролива интенсивность теплового излучения составляла 50 кВт/м².

Нельзя не коснуться вопросов возникновения огненных шаров на резервуарах с газообразным и жидким водородом, которым посвящены работы [35, 36]. В работе [35] экспериментально изучены взрывы автомобильных топливных резервуаров со сжатым водородом при воздействии на них очага пожара. Рассмотрены также вопросы, связанные с безопасностью использования жидкого водорода.

В работе [36] методом CFD проведено моделирование процесса разрыва резервуара с жидким водородом при инициировании разрыва с помощью взрывчатых веществ (ВВ) с целью определения параметров образующихся ударных волн. Отмечено, что жидкий водород может перевозиться в автоцистернах с резервуарами объемом 60 м³ и более. При попадании такого резервуара в очаг пожара возможен BLEVE с образованием ударной волны, огненного шара и разлетом его фрагментов. Описана авария с резервуаром жидкого водорода (LH₂) объемом 76 м³. Авария началась с истечением продукта через сбросную трубу с образованием факела. Вызванные пожарные попытались потушить факел путем подачи воды, которая замерзла в отверстии сбросной трубы и прекратила истечение газа. Спустя некоторое время резервуар взорвался. Даны ссылки на работы [37, 38], в которых теоретически показана возможность BLEVE на резервуарах с LH₂ с использованием критерия предельной температуры перегрева. Отмечено, что для LH₂ BLEVE может иметь место при температуре 29,7 К и давлении 0,77 МПа [37] или 26,2 К и 0,42 МПа [38].

Со ссылкой на работу [39] описаны эксперименты, проведенные компанией BMW по определению давления в ударной волне и плотности теплового потока при разрыве резервуаров с LH₂. Опыты проведены с одностенными цилиндрическими резервуарами с тепловой изоляцией в виде твердой пены. Объем резерву-

аров составлял 120 л. Масса водорода в резервуарах варьировалась в диапазоне 1,8–5,4 кг.

В работе [36] на основе моделирования найдено, что структура ударной волны характеризуется тремя пиками давления. Первый пик давления обусловлен взрывом ВВ. Второй пик вызван выходом газовой фазы в атмосферу при разгерметизации резервуара, смешением ее с воздухом и сгоранием образующейся газозооной смеси. Третий пик обусловлен BLEVE, в результате которого образуется огненный шар. При этом второй пик характеризуется более высоким давлением, чем третий, который, как раньше считалось, представляет наибольшую опасность. Отмечено, что величина второго пика обусловлена особенностями сгорания водородозооных смесей в связи с высокой нормальной скоростью горения водорода. Вероятно, для газов, имеющих более низкие нормальные скорости горения (например, для большинства углеводородных газов), такого эффекта не будет.

В работе [40] проведены эксперименты по изучению поведения резервуаров с LH₂ объемом 1 м³ при огневом воздействии пламени пропана, локализованного на горелках, размещенных под резервуарами. Интенсивность огневого воздействия составляла 100–150 кВт/м². Проведено 3 опыта, два из которых с двустенными резервуарами с вакуумной теплоизоляцией, и один с двустенным резервуаром с многослойной теплоизоляцией. Резервуары с вакуумной теплоизоляцией выдержали 80 мин и 4 ч огневого воздействия без разгерметизации внутренней оболочки (опыты были прекращены), а резервуар с многослойной теплоизоляцией — 40 мин, после чего произошел его взрыв с образованием огненного шара, ударной волны и разлетающихся фрагментов.

Выводы

В настоящей работе проанализированы общие закономерности возникновения и протекания аварий при реализации явления BLEVE. Выполнен краткий анализ имевших место в мировой практике такого рода инцидентов с резервуарами СПГ. Отмечено, данные аварии характеризуются обширными зонами поражения (до 1000 м) тепловым излучением огненных шаров, ударной волной и фрагментами от разрыва резервуаров. Проанализированы результаты экспериментальных и теоретических исследований явления BLEVE и параметров образующихся при этом огненных шаров. Рассмотрены полуэмпирические соотношения, описывающие зависимости диаметра огненного шара и его длительности от массы СПГ, содержащейся в резервуаре. Отмечено, указанные соотношения близки к полученным ранее для случая СУГ. Поверхностная плотность теплового потока от огненных шаров СПГ составляет около

500 кВт/м², что заметно выше, чем для случая СУГ (350 кВт/м²). Высота подъема центра огненного шара над поверхностью земли близка к его диаметру. Отмечены работы по изучению явления BLEVE на резервуарах с жидким водородом. На основе про-

веденного анализа сделан вывод о возможности возникновения BLEVE на резервуарах СПГ и жидкого водорода и высокой опасности этого явления, характеризующегося обширными зонами поражения опасными факторами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маршал В. Основные опасности химических производств. М. : Мир, 1989. 671 с.
2. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. Взрывные явления: оценка и последствия. М. : Мир, 1986. Т. 1, 2.
3. Шевчук А.П., Симонов О.А., Шебеко Ю.Н., Фахрисламов Р.З. Закономерности протекания аварий на резервуарах со сжиженными углеводородными газами с образованием огненных шаров // Химическая промышленность. 1991. № 6. С. 338–340.
4. Planas-Cuchi E., Gassula N., Ventosa A., Casal J. Explosion of a road tanker containing liquefied natural gas // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2004. Vol. 17. Pp. 315–321. DOI: 10.1016/j.jlp.2004.05.005
5. Planas E., Pastor E., Casal J., Bonilla J.M. Analysis of the boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) of a liquefied natural gas road tanker: The Zarzalico accident // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015. Vol. 34. Pp. 127–138. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.01.026
6. Wang K., Quin X., He Y., Shi T., Zhang X. Failure analysis integrated with prediction model for LNG transport trailer and thermal hazards induced by an accidental VCE: A case study // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 108. P. 104350. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104350
7. McDevitt C.A., Chan C.K., Steward F.R., Tennankore K.N. Initiation step of boiling liquid expanding vapor explosions // Journal of Hazardous Materials. 1990. Vol. 25. Issue 1–3. Pp. 169–180.
8. Abbasi T., Abbasi S.A. The boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE): Mechanism, consequences assessment, management // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 141. Issue 3. Pp. 489–519. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.09.056
9. Шебеко Ю.Н. Критерий возможности возникновения взрыва резервуара с перегретой жидкостью // Химическая промышленность. 1994. № 5. С. 302–305.
10. Frost D.L. Dynamics of explosive boiling of a droplet // Physics of Fluids. 1988. Vol. 31. Issue 9. Pp. 2554–2561. DOI: 10.1063/1.866608
11. Frost D., Sturtevant B. Effects of ambient pressure on the instability of a liquid boiling explosively at the superheat limit // Journal of Heat Transfer. 1986. Vol. 108. Issue 2. Pp. 418–424.
12. Shepherd J.E., Sturtevant B. Rapid evaporation at the superheat limit // Journal of Fluid Mechanics. 1982. Vol. 121. Pp. 379–402.
13. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu. On the mechanism of a BLEVE occurrence due to fire engulfment of tanks with overheated liquids // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015. Vol. 36. Pp. 167–170. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.06.006
14. Jingde Li, Hong Hao. Numerical simulation of medium to large scale bleve and the prediction of BLEVE's blast wave in obstructed environment // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 145. Pp. 94–109.
15. Li Q., Wang Y., Li L., Hao H., Wang R., Li J. Prediction of BLEVE loads on structures using machine learning and CFD // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 171. Pp. 914–925.
16. Birk A.M., Eyssette R., Heymes F. Early moments of Bleve: From vessel opening to liquid flashing release // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 132. Pp. 35–46. DOI: 10.1016/j.psep.2019.09.028
17. Hemmatian B., Casal J., Planas E. A new procedure to estimate BLEVE overpressure // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 111. Pp. 320–325. DOI: 10.1016/j.psep.2017.07.016
18. Hemmatian B., Planas E., Casal J. Comparative analysis of BLEVE mechanical energy and overpressure modelling // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 106. Issue 3. Pp. 138–149. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.007
19. Ustolin F., Toliass I.C., Giannissi S.G., Venetsanos A.G., Paltrinieri N. A CFD analysis of liquefied gas vessel explosions // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 159. Pp. 61–75. DOI: 10.1016/j.psep.2021.12.048
20. Bariha N., Mishra I.M., Srivastava V.C. Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG): A case study of LPG truck tanker accident in Kannur, Kerala, India // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 40. Pp. 449–460. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.020
21. Kohout A., Jain P., Dick W. Review, identification and analysis of local impact of projectile hazard in the LNG industry: A LNG storage tanks case study // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 57. Pp. 304–319. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.07.018

22. Hemmatian B., Casal J., Planas E., Rashtchian D. BLEVE: The case of water and a historical survey // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 57. Pp. 231–238. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.12.001
23. Wang Y., Gu X., Xia L., Pan Y., Ni Y., Wang S., Zhou W. Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 68. Issue 3. P. 104919. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104319
24. Birk A.M., Eyssette R., Heymes F. Analysis of BLEVE overpressure using spherical shock theory // *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 134. Pp. 108–120. DOI: 10.1016/j.psep.2019.11.023
25. Zhang Q.-X., Liang D. Thermal radiation and impact assessment of the LNG BLEVE fireball // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 52. Pp. 602–606. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.192
26. Methods for the calculation of physical effects (“Yellow Book”). CPR 14E (parts 1 and 2). The Hague, Committee for the Prevention of Disasters. 3rd Ed. 1997.
27. Betteridge S., Phillips L. Large scale pressurized LNG BLEVE experiments // *Symposium series No. 160. Hazards 25. Shell*, 2015.
28. Roberts A.F. Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage // *Fire Safety Journal*. 1982. Vol. 4. Pp. 197–212. DOI: 10.1016/0379-7112(81)90018-7
29. Hasegawa K., Saito K. Study on the fireball following steam of n-pentane // *Proceedings of the Second International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*. Heidelberg, 1977. Pp. 297–304.
30. Roberts A.F. The effect of conditions prior to loss of containment of fireball behavior // *International Chemical Engineering Symposium*. Series No. 71. Oxford, Pergamon Press, 1982.
31. Birk A.M., Andersson R.J., Coppens A.J. A computer simulation of a derailment accident: Part I: Model basis // *Journal of Hazardous Materials*. 1990. Vol. 25. Issue 1–2. Pp. 121–147.
32. Wang K., Lui Z., Qian X., Huang P. Long-term consequence and vulnerability assessment of thermal radiation hazard from LNG explosive fireball in open space based on full-scale experiment and PHAST // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017. Vol. 46. Pp. 13–22. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.01.001
33. Wang K., He Y., Lui Z., Qian X. Experimental study on optimization models for evaluation of fireball characteristics and thermal hazards induced by LNG vapor cloud explosions based on colorimetric thermometry // *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 366. Pp. 282–292. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.10.087
34. Raj P.K. LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 140. Issue 3. Pp. 444–464. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.029
35. Zalosh R. Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure // *Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Edinburgh, 2008. Pp. 149–158.
36. Cirrone D., Makarov D., Molkov V. Rethinking “BLEVE explosion” after liquid hydrogen storage tank rupture in a fire // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. Issue 23. Pp. 8716–8730. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.114
37. Hansen O.R. Liquid hydrogen releases show dense gas behavior // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Pp. 1343–1358. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.060
38. Ustolin F., Paltrinieri N., Landucci G. An innovative and comprehensive approach for the consequence analysis of liquid hydrogen vessel explosions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 68. P. 104323. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104323
39. Pehr K. Aspects of safety and acceptance of LH₂ tank systems in passenger cars // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1996. Vol. 21. Issue 5. Pp. 387–395. DOI: 10.1016/0360-3199(95)00092-5
40. Wingerden K., Kluge M., Habib A.K., Ustolin F., Paltrinieri N. Medium-scale tests to investigate the possibility and effects of BLEVEs of storage vessels containing liquefied hydrogen // *Chemical Engineering Transactions*. 2022. Vol. 90. Pp. 547–552. DOI: 10.3303/CET2290092

REFERENCES

1. Marshall V.C. *Major chemical hazards*. New York, Ellis Horwood Limited, 1987; 671.
2. Baker W.E., Cox P.A., Westline P.S., Kulesz J.J., Strelow R.A. *Explosion hazards and evaluation*. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1983; 1, 2.
3. Shevchuck A.P., Simonov O.A., Shebeko Yu.N., Fakhrislamov R.Z. The regularities of accidents on LPG tanks with a fireballs occurrence. *Chemical Industry*. 1991; 6:338-340. (rus).
4. Planas-Cuchi E., Gassula N., Ventosa A., Casal J. Explosion of a road tanker containing liquefied natural gas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2004; 17:315-321. DOI: 10.1016/j.jlp.2004.05.005
5. Planas E., Pastor E., Casal J., Bonilla J.M. Analysis of the boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) of a liquefied natural gas road tanker: The Zarzalico accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 34:127-138. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.01.026

6. Wang K., Quin X., He Y., Shi T., Zhang X. Failure analysis integrated with prediction model for LNG transport trailer and thermal hazards induced by an accidental VCE: A case study. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 108:104350.
7. McDevitt C.A., Chan C.K., Steward F.R., Tennankore K.N. Initiation step of boiling liquid expanding vapor explosions. *Journal of Hazardous Materials*. 1990; 25(1-3):169-180.
8. Abbasi T., Abbasi S.A. The boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE): Mechanism, consequences assessment, management. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 141(3):489-519. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.09.056
9. Shebeko Yu.N. The criteria of possibility of BLEVE occurrence. *Chemical Industry*. 1994; 5:302-305. (rus).
10. Frost D.L. Dynamics of explosive boiling of a droplet. *Physics of Fluids*. 1988; 31(9):2554-2561. DOI: 10.1063/1.866608
11. Frost D., Sturtevant B. Effects of ambient pressure on the instability of a liquid boiling explosively at the superheat limit. *Journal of Heat Transfer*. 1986; 108(2):418-424.
12. Shepherd J.E., Sturtevant B. Rapid evaporation at the superheat limit. *Journal of Fluid Mechanics*. 1982; 121:379-402.
13. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu. On the mechanism of a BLEVE occurrence due to fire engulfment of tanks with overheated liquids. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 36:167-170. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.06.006
14. Jingde Li, Hong Hao. Numerical simulation of medium to large scale bleve and the prediction of BLEVE's blast wave in obstructed environment. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 145:94-109.
15. Li Q., Wang Y., Li L., Hao H., Wang R., Li J. Prediction of BLEVE loads on structures using machine learning and CFD. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023; 171:914-925.
16. Birk A.M., Eyssette R., Heymes F. Early moments of Bleve: From vessel opening to liquid flashing release. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019; 132:35-46. DOI: 10.1016/j.psep.2019.09.028
17. Hemmatian B., Casal J., Planas E. A new procedure to estimate BLEVE overpressure. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 111:320-325. DOI: 10.1016/j.psep.2017.07.016
18. Hemmatian B., Planas E., Casal J. Comparative analysis of BLEVE mechanical energy and overpressure modelling. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 106(3):138-149. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.007
19. Ustolin F., Tolia I.C., Giannissi S.G., Venetsanos A.G., Paltrinieri N. A CFD analysis of liquefied gas vessel explosions. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022; 159:61-75. DOI: 10.1016/j.psep.2021.12.048
20. Bariha N., Mishra I.M., Srivastava V.C. Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG): A case study of LPG truck tanker accident in Kannur, Kerala, India. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 40:449-460. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.020
21. Kohout A., Jain P., Dick W. Review, identification and analysis of local impact of projectile hazard in the LNG industry: A LNG storage tanks case study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 57:304-319. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.07.018
22. Hemmatian B., Casal J., Planas E., Rashtchian D. BLEVE: The case of water and a historical survey. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 57:231-238. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.12.001
23. Wang Y., Gu X., Xia L., Pan Y., Ni Y., Wang S., Zhou W. Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68(3):104919. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104319
24. Birk A.M., Eyssette R., Heymes F. Analysis of BLEVE overpressure using spherical shock theory. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020; 134:108-120. DOI: 10.1016/j.psep.2019.11.023
25. Zhang Q.-X., Liang D. Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage. *Procedia Engineering*. 2013; 52:602-606. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.192
26. Methods for the calculation of physical effects ("Yellow Book"). CPR 14E (parts 1 and 2). The Hague, Committee for the Prevention of Disasters. 3rd Ed. 1997.
27. Betteridge S., Phillips L. Large scale pressurized LNG BLEVE experiments. *Symposium series no.160. Hazards 25. Shell*, 2015.
28. Roberts A.F. Thermal radiation hazards from released LPG from pressurized storage. *Fire Safety Journal*. 1982; 4:197-212. DOI: 10.1016/0379-7112(81)90018-7
29. Hasegawa K., Saito K. Study on the fireball following steam of n-pentane. *Proceedings of the Second International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*. Heidelberg, 1977; 297-304.
30. Roberts A.F. The effect of conditions prior to loss of containment of fireball behavior. *International Chemical Engineering Symposium. Series. No. 71*. Oxford, Pergamon Press, 1982.
31. Birk A.M., Andersson R.J., Coppens A.J. A computer simulation of a derailment accident: Part I — Model basis. *Journal of Hazardous Materials*. 1990; 25(1-2):121-147.
32. Wang K., Lui Z., Qian X., Huang P. Long-term consequence and vulnerability assessment of thermal radiation hazard from LNG explosive fireball in open space based on full-scale experiment and PHAST. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017; 46:13-22. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.01.001

33. Wang K., He Y., Lui Z., Qian X. Experimental study on optimization models for evaluation of fireball characteristics and thermal hazards induced by LNG vapor cloud explosions based on colorimetric thermometry. *Journal of Hazardous Materials*. 2019; 366:282-292. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.10.087
34. Raj P.K. LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 140(3):444-464. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.029
35. Zalosh R. Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure. *Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Edinburgh, 2008; 149-158.
36. Cirrone D., Makarov D., Molkov V. Rethinking “BLEVE explosion” after liquid hydrogen storage tank rupture in a fire. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48(23):8716-8730. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.114
37. Hansen O.R. Liquid hydrogen releases show dense gas behavior. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45:1343-1358. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.060
38. Ustolin F., Paltrinieri N., Landucci G. An innovative and comprehensive approach for the consequence analysis of liquid hydrogen vessel explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68:104323. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104323
39. Pehr K. Aspects of safety and acceptance of LH₂ tank systems in passenger cars. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1996; 21(5):387-395. DOI: 10.1016/0360-3199(95)00092-5
40. Wingerden K., Kluge M., Habib A.K., Ustolin F., Paltrinieri N. Medium-scale tests to investigate the possibility and effects of BLEVEs of storage vessels containing liquefied hydrogen. *Chemical Engineering Transactions*. 2022; 90:547-552. DOI: 10.3303/CET2290092

Поступила 08.05.2023, после доработки 28.05.2023;

принята к публикации 06.06.2023

Received May 8, 2023; Received in revised form May 28, 2023;

Accepted June 6, 2023

Информация об авторе

ШЕБЕКО Юрий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 47042; Scopus AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Information about the authors

Yury N. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 47042; Scopus AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Особенности обеспечения пожарной безопасности при проектировании строительных конструкций модульных зданий

Азамат Абдуллахович Гасиев^{1,2}✉, Владимир Валерьевич Павлов³,
Александр Васильевич Гомозов³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

² Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, г. Москва, Россия

³ Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Обеспечение широкого и эффективного внедрения в практику строительства модульных зданий обуславливает необходимость разработки современных требований к пределам огнестойкости и классу пожарной опасности строительных конструкций этих зданий, а также разработку и обоснование эффективных технических решений, позволяющих реализовать данные требования.

Цели и задачи. Целью статьи является разработка требований к пределам огнестойкости и классу пожарной опасности строительных конструкций модульных зданий, а также к пределам огнестойкости примыканий и узлов крепления, для которых положениями Федерального закона № 123-ФЗ и нормативными документами по пожарной безопасности указанные требования не установлены в необходимом объеме, а также разработка и обоснование эффективных технических решений, позволяющих реализовать указанные требования. Апробация результатов вышеуказанных разработок на объектах различной этажности и функционального назначения.

Методы. Используется аналитический метод обоснования требований к пределам огнестойкости и классу пожарной опасности строительных конструкций модульных зданий, дополняющий и детализирующий в необходимом объеме положения Федерального закона № 123-ФЗ и нормативных документов по пожарной безопасности, с учетом результатов расчетов и огневых испытаний огнестойкости и классов пожарной опасности основных строительных конструкций модульных зданий.

Результаты. Внедрение результатов работы в проекты противопожарной защиты модульных зданий различного назначения и этажности, разработка предложений в СП 2.13130.2020 по требованиям к пределам огнестойкости и классам пожарной опасности для объектов из данных конструкций.

Выводы. На основе исследований разработаны требования к пределам огнестойкости и классу пожарной опасности конструкций объемно-блочной модульной системы (ОБМС), отличительной особенностью которой является расположение несущих элементов внутри ограждающих конструкций здания, вследствие чего положениями № 123-ФЗ и нормативных документов по пожарной безопасности не установлены требования к пределам огнестойкости элементов подобных систем, требования к огнестойкости узлов крепления и примыкания, а также требования к классам их пожарной опасности. Разработанные требования носят комбинированный характер, т.е. содержат минимально необходимые и отличные друг от друга по численному значению требования по признакам R, а также по E и I для каждой конструкции, и позволяют в сочетании с разработанными требованиями к узлам крепления обеспечить общую прочность и пространственную устойчивость конструктивной системы, а также предотвратить прогрессирующее (лавинообразное) разрушение конструкций, находящихся за пределами очага пожара. Проведено обоснование эффективных технических решений, позволяющих реализовать разработанные требования.

Ключевые слова: универсальная объемно-блочная модульная система; предел огнестойкости конструкций; класс пожарной опасности модульных конструкций; узел крепления; узел примыкания; огнестойкость

Для цитирования: Гасиев А.А., Павлов В.В., Гомозов А.В. Особенности обеспечения пожарной безопасности при проектировании строительных конструкций модульных зданий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 42–57. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.42-57

✉ Гасиев Азамат Абдуллахович, e-mail: gasiev@bk.ru

Fire safety in the design of building structures of modular buildings

Azamat A. Gasiev^{1,2}✉, Vladimir V. Pavlov³, Alexander V. Gomofov³

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

² Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

³ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Updated requirements to (1) fire resistance limits and (2) the fire hazard class of building structures must be developed, and effective engineering solutions, allowing to implement these requirements, must be developed and substantiated due to the effective large-scale introduction of modular buildings into construction practice.

Goals and objectives. The aim of the article is to develop requirements to fire resistance limits, to the fire hazard class of building structures of modular buildings, and to fire resistance limits of intersections and fastening units, that are beyond the scope of Federal Law No. 123-FZ and fire safety regulations. The aim of the article also encompasses the development and justification of effective engineering solutions required to implement these requirements, as well as the pilot testing of the above-mentioned findings at construction facilities, having different numbers of storeys and functional purposes.

Methods. The analytical method is employed to substantiate the requirements applied to fire resistance limits and the fire hazard class of modular building structures. The proposed method supplements and refines provisions of the Federal Law No. 123-FZ and other fire safety regulations, taking into account the results of calculations and fire tests of fire resistance and fire hazard classes of basic building constructions of modular buildings.

Results. Introduction of the results of the work in fire safety designs of modular buildings, having different purposes and numbers of storeys; development of revisions for SP (Construction Regulations) 2.13130.2020 in compliance with the requirements applied to fire resistance limits and fire hazard classes for facilities composed of these structures.

Conclusion. Requirements for fire resistance limits and fire hazard classes were developed on the basis of the research; their distinctive feature is the location of load-bearing elements inside the building envelope, as a result of which provisions of No. 123-FZ and regulatory documents on fire safety do not establish requirements for the fire resistance limits of elements of such systems, requirements for fire resistance of intersections and fastening units, as well as requirements for fire hazard classes. The requirements have a combined nature, in other words, they contain minimum necessary and numerically different requirements for R, E, and I signs of each structure. They ensure the overall strength and 3D stability of the structural system and prevent the progressive collapse of structures outside the fire. Effective engineering solutions, allowing to implement the developed requirements, were substantiated.

Keywords: universal volume-block modular system; fire resistance limit of structures; fire hazard class of modular structures; attachment point; junction point; fire resistance

For citation: Gasiev A.A., Pavlov V.V., Gomofov A.V. Fire safety in the design of building structures of modular buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4):42-57. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.42-57 (rus).

✉ Azamat Abdullahovich Gasiev, e-mail: gasiev@bk.ru

Введение

Внедрение технологий модульного объемно-блочного строительства на сегодня является актуальной и важной задачей, данные технологии могут стать одним из инструментов решения поставленных руководством страны задач в области жилищного строительства. Для развития модульных технологий Минстроем России принята дорожная карта, утвержденная приказом министерства № 22-П/08 от 08.08.2022 г.

Вместе с тем обеспечение широкого и эффективного внедрения в практику строительства модульных зданий обуславливает необходимость разработки современных требований к пределам огнестойкости

и классам пожарной опасности строительных конструкций этих зданий, а также разработки эффективных технических решений *по реализации разработанных требований*.

Проблема совершенствования норм для внедрения новых технологий строительства, в том числе в области пожарной безопасности, сформулирована в [1].

Данная статья является развитием обзорной статьи [2], в которой описана универсальная объемно-блочная модульная система (ОБМС) с несущим металлическим каркасом.

Как показано в [2], основой конструктивной системы ОБМС являются стальные рамные каркасы, выполняемые из горячекатаных и холодногнутых

профилей различного сечения. Каркасы обшиты листовыми материалами типа ГВЛ, ГКЛО или аналогичными материалами, с внутренним заполнением теплоизоляционными материалами из минеральной ваты, которые изготавливаются на основе технических условий [3] и др.

При этом конструкции, образующие рамный каркас, выполняют функцию несущих элементов здания, т.е. обеспечивают общую прочность и пространственную устойчивость здания, а также предотвращают прогрессирующее (лавинообразное) разрушение конструкций, находящихся за пределами очага пожара. Специфической особенностью конструктивной системы ОБМС является то, что ее отдельные несущие элементы расположены внутри ограждающих конструкций здания — наружных стен, покрытий, внутренних стен и перегородок и т.д.

Указанная особенность конструктивной системы не позволяет обоснованно и однозначно применять требования табл. 21 № 123-ФЗ, поскольку в ней содержатся только дифференцированные требования к пределам огнестойкости строительных конструкций, являющиеся только ограждениями, только несущими элементами и т.д. Таким образом, положениями № 123-ФЗ не установлены достаточные для проектирования требования к пределам огнестойкости элементов конструктивной системы ОБМС, и данные требования должны быть разработаны и обоснованы. Указанные требования с целью обеспечения экономической целесообразности должны носить комбинированный характер, т.е. содержать для каждой конструкции минимально необходимые и отличные друг от друга по численному значению требования по признакам R, E и I.

Аналогичным образом, положения № 123-ФЗ (в том числе табл. 23) и [4] не содержат требований к противопожарным перегородкам, которые выполняют функции несущих элементов.

Кроме того, необходимо уточнение положений ч. 2 ст. 137 ФЗ-123 и [4] применительно к узлам примыкания внутренних стен лестничных клеток к наружным ограждениям.

Класс пожарной опасности конструктивных систем типа ОБМС, где численные значения пределов огнестойкости по признакам E или I отличаются от численного значения предела огнестойкости по признаку R положениями ГОСТ 30403–2012 «Конструкции строительные. Метод испытания на пожарную опасность» (далее ГОСТ 30403), не определен. Данное обстоятельство также требует проведения необходимых научных обоснований.

С учетом изложенного целью настоящей статьи является разработка комбинированных требований к пределам огнестойкости и классу пожарной опасности элементов конструктивной системы ОБМС,

узлам крепления и примыкания, а также разработка технических решений, позволяющих реализовать данные требования. В рамках статьи проведен анализ результатов внедрения вышеуказанных разработок на объектах различного назначения.

Обоснование пределов огнестойкости и классов пожарной опасности строительных конструкций ОБМС

Обоснование пределов огнестойкости и классов пожарной опасности строительных конструкций проведено для систем ОБМС, которые должны отвечать требованиям к зданиям II степени огнестойкости и класса конструктивной пожарной опасности С0.

Бесчердачные покрытия и наружные стены в таких зданиях следует проектировать с пределами огнестойкости RE 15 и E 15 соответственно.

Согласно положениям [4], предел огнестойкости наружных несущих стен по потере целостности (E) должен быть не менее требуемого предела огнестойкости для наружных ненесущих стен (при этом возможность применения данного положения для несущих элементов здания не оговорена).

С учетом того, что наружные стены и покрытие являются несущими элементами, с помощью которых необходимо обеспечить общую прочность, пространственную устойчивость, а также предотвращение прогрессирующего обрушения конструктивной системы ОБМС при пожаре, в сочетании с экономической целесообразностью предложены следующие комбинированные требования к пределам огнестойкости наружных ограждающих конструкций данной системы:

- предел огнестойкости наружных стен R 90/E 15;
- предел огнестойкости бесчердачных покрытий R 90/E 15.

Междуэтажные перекрытия являются элементом конструктивной системы ОБМС, т.е. являются несущими элементами. С учетом этого их предел огнестойкости должен быть не менее R 90/EI 45.

Противопожарные преграды для выделения технических помещений, деления здания на секции и т.д., предусмотренные в составе конструктивной системы ОБМС, также являются несущими элементами. С учетом этого их предел огнестойкости должен быть не менее R 90/EI 45. Если противопожарные перегородки I-го типа имеют самостоятельный каркас или самостоятельную опору, то их предел огнестойкости может быть предусмотрен не менее EI 45.

При формировании требований к узлам крепления и примыкания необходимо учитывать, что положения [4] в части огнестойкости узлов примыкания и крепления требуют детализации и развития применительно к конструктивной системе ОБМС.

В частности, применение п. 5.2.1 [4] для узла примыкания внутренней стены лестничной клетки (REI 90) к наружной стене здания (R 90/E 15) предполагает, что предел огнестойкости узла примыкания этих конструкций между собой должен быть не ниже минимального требуемого предела огнестойкости стыкуемых строительных конструкций, что не является корректным.

Поэтому разработанные требования предусматривают, что узел примыкания внутренней стены лестничной клетки к наружной стене здания должен иметь предел огнестойкости не ниже EI 90.

При этом предел огнестойкости узлов крепления этих конструкций должен быть не менее R 90.

Аналогичным образом, прямое применение п. 5.2.1 [4] для узла примыкания внутренней стены лестничной клетки (REI 90) к покрытию здания (R 90/E 15) или к межэтажному перекрытию (R 90/E 45) без учета специфических особенностей конструктивной системы ОБМС также не будет корректным. Поэтому разработанные требования предусматривают, что узел примыкания внутренней стены лестничной клетки к покрытию или к перекрытию здания должен иметь предел огнестойкости не ниже EI 90, а предел огнестойкости узлов крепления этих конструкций должен быть не менее R 90.

Согласно разработанным требованиям, предел огнестойкости других узлов крепления и примыкания строительных конструкций в составе ОБМС должен соответствовать:

- для узлов крепления и примыкания наружных несущих стен к конструкциям междуэтажных перекрытий (в том числе чердачного и над подвалами, отвечающих за устойчивость здания) — R 90 для узла крепления и EI 45 для узла примыкания;
- для узлов крепления и примыкания внутренних несущих стен к конструкциям междуэтажных перекрытий (в том числе чердачного и над подвалами, отвечающих за устойчивость здания) — R 90 для узла крепления и EI 45 для узла примыкания;
- для узлов крепления и примыкания внутренних и наружных несущих стен к конструкциям междуэтажных перекрытий с пределом огнестойкости REI 45 (в том числе чердачного и над подвалами, не участвующих в обеспечении устойчивости здания) — R 45 для узла крепления и EI 45 для узла примыкания.

Обоснование требований к классу пожарной опасности элементов системы ОБМС базировалось на положениях ГОСТ 30403.

Для простых конструкций, у которых численные значения пределов огнестойкости по признакам E или I не отличаются от численного значения предела огнестойкости по признаку R, при форми-

ровании требований по классу пожарной опасности исходят из положений ГОСТ 30403.

Однако в ГОСТ 30403 не определен порядок проведения испытаний для конструкций, предел огнестойкости которых носит комбинированный характер (т.е. когда численные значения пределов огнестойкости по признакам E или I отличаются от численного значения предела огнестойкости по признаку R), а также не определен порядок классификации таких конструкций по классу пожарной опасности.

Исходя из этого, разработанные требования к классу пожарной опасности элементов системы ОБМС базируются на предположении, что данные элементы должны соответствовать классу K0 при испытаниях, продолжительность которых соответствует максимальному численному значению из признаков по E, I или R.

Обеспечение огнезащиты конструкций ОБМС

Разработка огнезащиты конструкций ОБМС базировалась на результатах анализа особенностей поведения стальных конструкций при пожаре [5–7], методологических положениях расчетов их пределов огнестойкости как с огнезащитой, так и без огнезащиты [8–18], а также огневых испытаний [19, 20].

На основе анализа разработанной ВНИИПО структурно-методологической схемы выбора огнезащиты конструкций (рис. 1) с учетом [10, 21–23] принято решение, что для конструкций ОБМС наиболее целесообразно применение огнезащитной теплоизоляции, устраиваемой сухим способом с применением обшивных плитных материалов.

На первом этапе обоснования параметров огнезащиты использован расчетный метод. При этом расчетное обоснование огнезащиты несущих стальных конструкций предусматривало решение следующих задач:

- выбор огнезащитных материалов для несущих конструкций;
- расчет толщины огнезащиты для несущих стоек и балок.

Степень огнестойкости модульных зданий зависит от несущей способности всего силового металлического каркаса. Поэтому потеря прочности или устойчивости каркаса в условиях пожара может произойти вследствие нагревания и снижения сопротивления одного из составляющих его элементов. Для выявления наиболее слабого, с точки зрения огнестойкости, элемента необходимо определить пределы огнестойкости всех нагруженных элементов каркаса. Для определения фактического предела огнестойкости несущих элементов стального каркаса необходимо разбить сложносоставную конструкцию на ряд простейших элементов, представляющих собой стержневые металлические конструкции, поддающи-



Рис. 1. Структурно-методологическая схема выбора огнезащиты для стальных конструкций [10]

Fig. 1. Structural and methodological scheme for the choice of fire protection for steel structures [10]

еся расчетам на огнестойкость. Эти элементы определяются из спецификации проекта в соответствии со схемой конструкций модульного здания системы ОБМС, которая приведена на рис. 2.

Из рис. 2 можно сделать вывод, что пределы огнестойкости основных конструкций ОБМС должны устанавливаться исходя из воздействия пожара как с одной стороны, так и нескольких, что необходимо учитывать при обосновании решений по огнезащите этих конструкций.

Анализ элементов каркаса показал, что наиболее слабыми с точки зрения огнестойкости элементами являются металлические конструкции с приведенной толщиной около 4 мм.

В связи с тем, что в системе ОБМС строительные конструкции выполняют функции как несущих, так и ограждающих элементов, обшивка и утеплитель ограждающих элементов (стеновые и потолочные панели) с одной из сторон одновременно являются конструктивной огнезащитой стальных несущих конструкций.

При анализе предела огнестойкости незащищенных элементов каркаса системы ОБМС по методике [11] установлено, что полученное значение существенно ниже требуемого показателя в 90 мин, что обуславливает необходимость огнезащиты этих элементов.

Как уже отмечалось выше, в качестве огнезащиты стальных элементов несущих каркасов здания должны быть использованы двухслойные обшивки из листов ГВЛ или ГКЛЮ толщиной по 12,5 мм каждый, а также слой теплоизоляции из минеральной (каменной) ваты, находящийся в составе конструкций.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости времени прогрева металлических конструкций с различной приведенной толщиной металла от количества листов ГВЛ при прогреве с 4-х сторон, используемых для их облицовки. Анализ диаграмм на рис. 3 показывает, что для стальных конструкций, имеющих минимальную приведенную толщину металла не менее 3,5 мм, для обеспечения предела огнестойкости R 90 необходима его двухслойная обшивка из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм каждый (время достижения критической температуры $t_{кр} = 500^\circ\text{C}$ будет превышать 90 мин). Для обеспечения предела огнестойкости R 120 стальных конструкций, имеющих минимальную приведенную толщину металла не менее 3,5 мм, необходима их трехслойная обшивка из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм каждый (время достижения критической температуры $t_{кр} = 500^\circ\text{C}$ будет превышать 120 мин).

Согласно описанным выше конструктивным решениям, для обеспечения указанных пределов огнестойкости в конструкциях ОБМС предусмот-

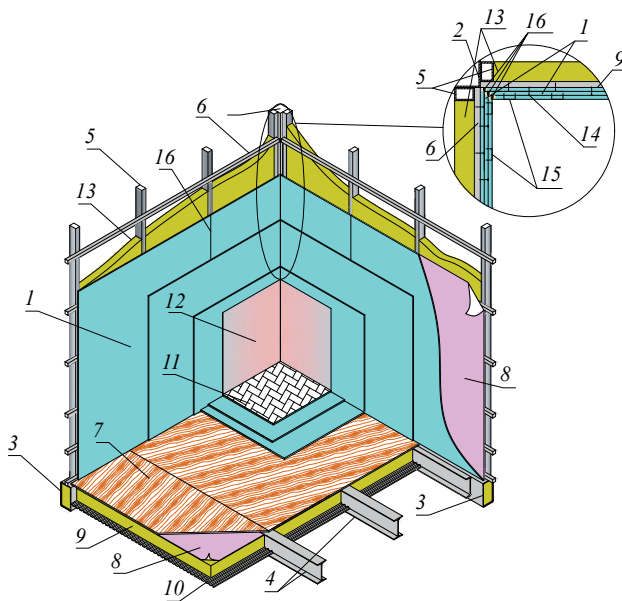
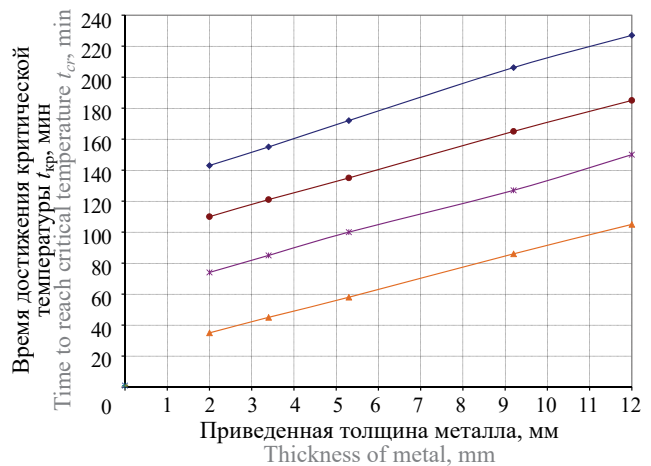


Рис. 2. Конструкция внутренней части модуля: 1 — обшивка слоями ГВЛ (1–3 слоя) пола и стен; 2 — основная стойка каркаса модуля; 3 — основная нижняя балка каркаса модуля прямоугольного сечения; 4 — балка пола модуля таврового сечения; 5 — промежуточные стойки каркаса модуля; 6 — горизонтальные направляющие для крепления внутренней обшивки модуля; 7 — OSB панели в обшивке пола; 8 — пароизоляция пола и стен; 9 — минераловатные маты — утеплитель в конструкции пола; 10 — гофрлист для установки утеплителя; 11 — отделочное покрытие пола; 12 — отделочное покрытие стен; 13 — минераловатные маты — утеплитель в конструкции стен; 14 — металлические гвозди для крепления 1 и 2-го слоев ГВЛ из газового монтажного пистолета; 15 — металлические скобы для крепления 3-го слоя ГВЛ; 16 — герметизирующий неорганический клей

Fig. 2. The design of the internal part of the module: 1 — sheathing with GFS layers (1–3 layers) of the floor and walls; 2 — main stand of the module frame; 3 — main lower beam of the frame of the module of rectangular section; 4 — beam floor of the T-section module; 5 — intermediate racks of the module frame; 6 — horizontal rails for fastening the inner skin of the module; 7 — OSB panels in the floor sheathing; 8 — vapor barrier of the floor and walls; 9 — mineral wool insulation mats in the floor structure; 10 — corrugator for installing insulation; 11 — finished flooring; 12 — finish wall covering; 13 — mineral wool insulation mats in the wall construction; 14 — metal nails for fastening 1 and 2 layers of GFS from a gas mounting gun; 15 — metal brackets for fixing 3 GFS salts; 16 — sealing inorganic adhesive

рено использование несущих металлических элементов с приведенной толщиной металла не менее 3,5 мм.

При этом выбранные параметры огнезащиты, как показывают результаты расчетов, обеспечивают время прогрева до критических температур металлических конструкций с приведенной толщиной металла не менее 3,5 мм более 90 мин, т.е. обеспечивают предел огнестойкости не менее R 90. Теплоизоляция из минеральной (каменной) ваты толщиной 100 мм, находящейся в составе конструкций, обеспечивает предел огнестойкости не менее EI 90.



Толщина огнезащитной облицовки из листов ГВЛ:
Thickness of fireproof cladding made of GFS:

— 12,5 мм / 12,5 мм * 25 мм / 25 мм
— 37,5 мм / 37,5 мм — 45 мм / 45 мм

Рис. 3. Зависимость времени достижения критической температуры от приведенной толщины металла и количества листов ГВЛ

Fig. 3. Dependence of the time to reach the critical temperature on the reduced thickness of the metal and the number of GFS

Трехслойные обшивки из листов ГВЛ (ГКЛО) толщиной по 12,5 мм каждый, а также слой теплоизоляции из минеральной (каменной) ваты, находящийся в составе конструкций, обеспечивают время прогрева до критических температур металлических конструкций с приведенной толщиной металла не менее 3,5 мм более 120 мин, т.е. обеспечивают предел огнестойкости не менее REI 120.

Окончательное решение о корректности выбранных технических решений по огнезащите конструкций позволяет принять проведенные огневые испытания.

Основными конструктивными элементами зданий, возведенных по технологии ОБМС, обеспечивающими его несущую способность, устойчивость и геометрическую неизменяемость как в условиях эксплуатации, так и в условиях пожара, являются стальные несущие каркасы, которые выполняются из стандартных профилей, собираемых на сварке, согласно проекту.

Разработанные требования предполагают, что требуемый предел огнестойкости для элементов несущего каркаса здания составляет R 90.

Результаты огневых испытания подтвердили, что для обеспечения данного значения предела огнестойкости должны быть использованы двухслойные обшивки из листов ГВЛ, каждый из которых имеет толщину по 12,5 мм, а также слой теплоизоляции из минеральной (каменной) ваты толщиной не менее 100 мм. График результатов испытаний аналогичных конструкций перекрытия приведен на рис. 4. Из рисунка видно, что предельный прогиб в середине пролета перекрытия и предельная ско-

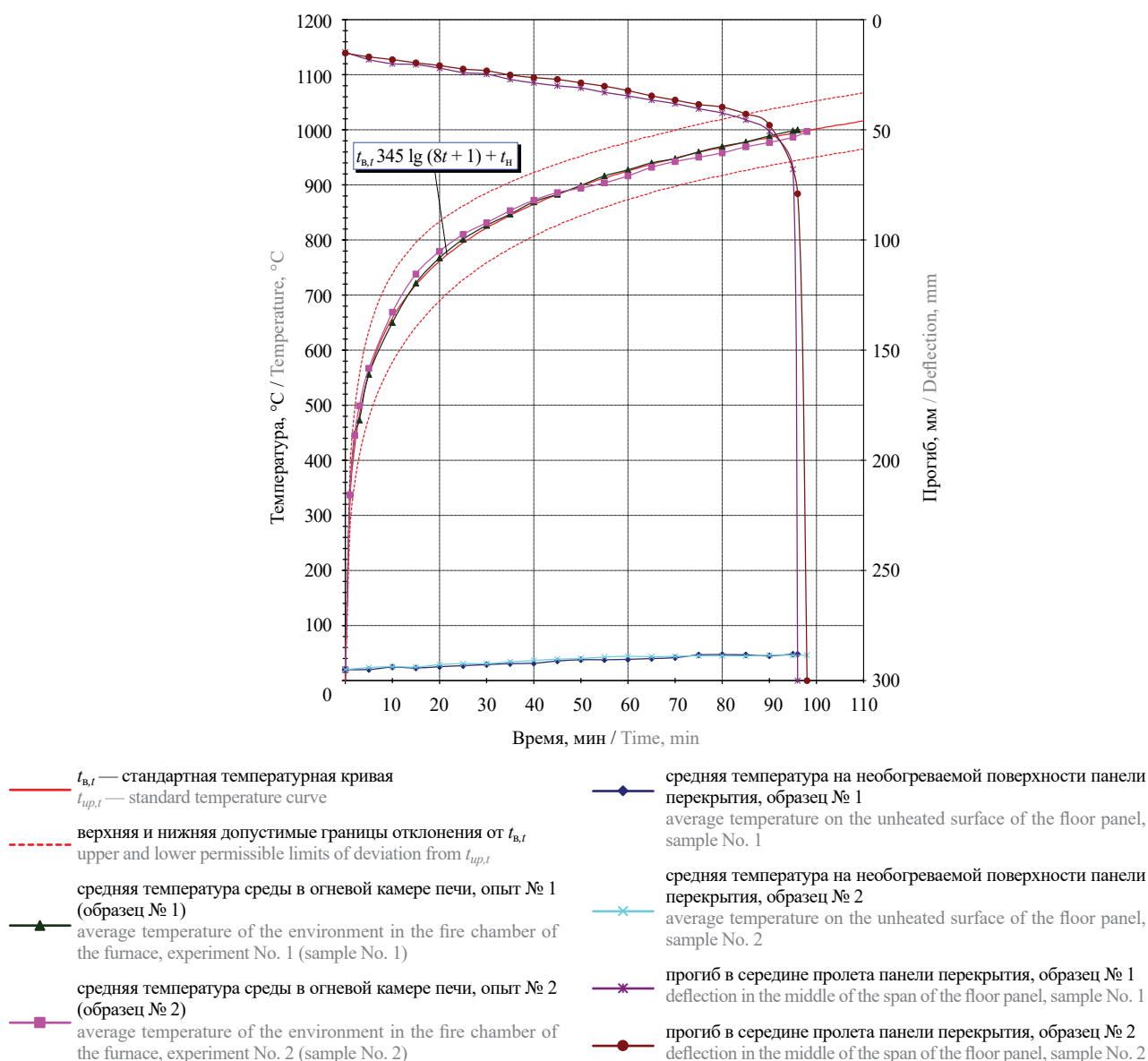


Рис. 4. Результат испытаний на огнестойкость перекрытия на основе металлических профилей с 2-слойной обшивкой из листов ГВЛ^{1, 2, 3}

Fig. 4. The result of tests for fire resistance of ceilings based on metal profiles with a 2-layer sheathing of GFS^{1, 2, 3}

рость нарастания деформаций имеют место на 94-й мин испытания. С учетом этого время достижения предельного состояния по потере несущей способности R составляет 94 мин. При этом на момент потери несущей способности температура на необогреваемой стороне перекрытия не превысила 48 °C, а появления сквозных трещин или отверстий, через

которые проникают продукты горения или пламя, не зафиксировано.

Аналогичным образом результаты огневых испытаний подтвердили, что для обеспечения предела огнестойкости R 120 должны быть использованы 3-слойные обшивки из листов ГВЛ, каждый из которых имеет толщину по 12,5 мм, а также слой теплоизоляции

¹ Отчет ИЛ НИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России № 0220-3.2 от 27.04.2017 г. об испытаниях на пожарную опасность «Огнестойкость многослойной конструкции внутренней несущей стеновой панели, изготовленной на основе стального каркаса из тонколистовых оцинкованных холодногнутох профилей ТУ 1120-001-44832776–2015 по технологии ООО «Термопрофиль» / А.В. Пехотников, В.В. Павлов. 12 л.

² Отчет ИЛ НИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России № 0221-3.2 от 27.04.2017 г. об испытаниях на пожарную опасность «Огнестойкость многослойной конструкции наружной несущей стеновой панели, изготовленной на основе стального каркаса из тонколистовых оцинкованных холодногнутох профилей ТУ 1120-001-44832776–2015 по технологии ООО «Термопрофиль» / А.В. Пехотников, В.В. Павлов. 13 л.

³ Отчет ИЛ НИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России № 0222-3.2 от 28.04.2017 г. об испытаниях на пожарную опасность «Огнестойкость многослойной конструкции междуэтажного перекрытия, изготовленного на основе стального каркаса из тонколистовых оцинкованных холодногнутох профилей ТУ 1120-001-44832776–2015 по технологии ООО «Термопрофиль» / А.В. Пехотников, В.В. Павлов. 13 л.

из минеральной (каменной) ваты толщиной не менее 100 мм. График результатов испытаний стальных двутавровых балок № 35Б1 по АСЧМ 20-93 с приведенной толщиной металла при условии 3-стороннего обогрева, равной 4,4 мм, приведен на рис. 5. Из рисунка видно, что предельный прогиб в середине пролета и предельная скорость нарастания деформаций имеют

место на 123-й мин испытания. С учетом этого время достижения предельного состояния по потери несущей способности R составляет 123 мин.

Кроме того, огневые испытания показали, что для обеспечения установленного требуемого предела огнестойкости REI 150 для строительных конструкций стен и перекрытий ОБМС зданий должны приме-

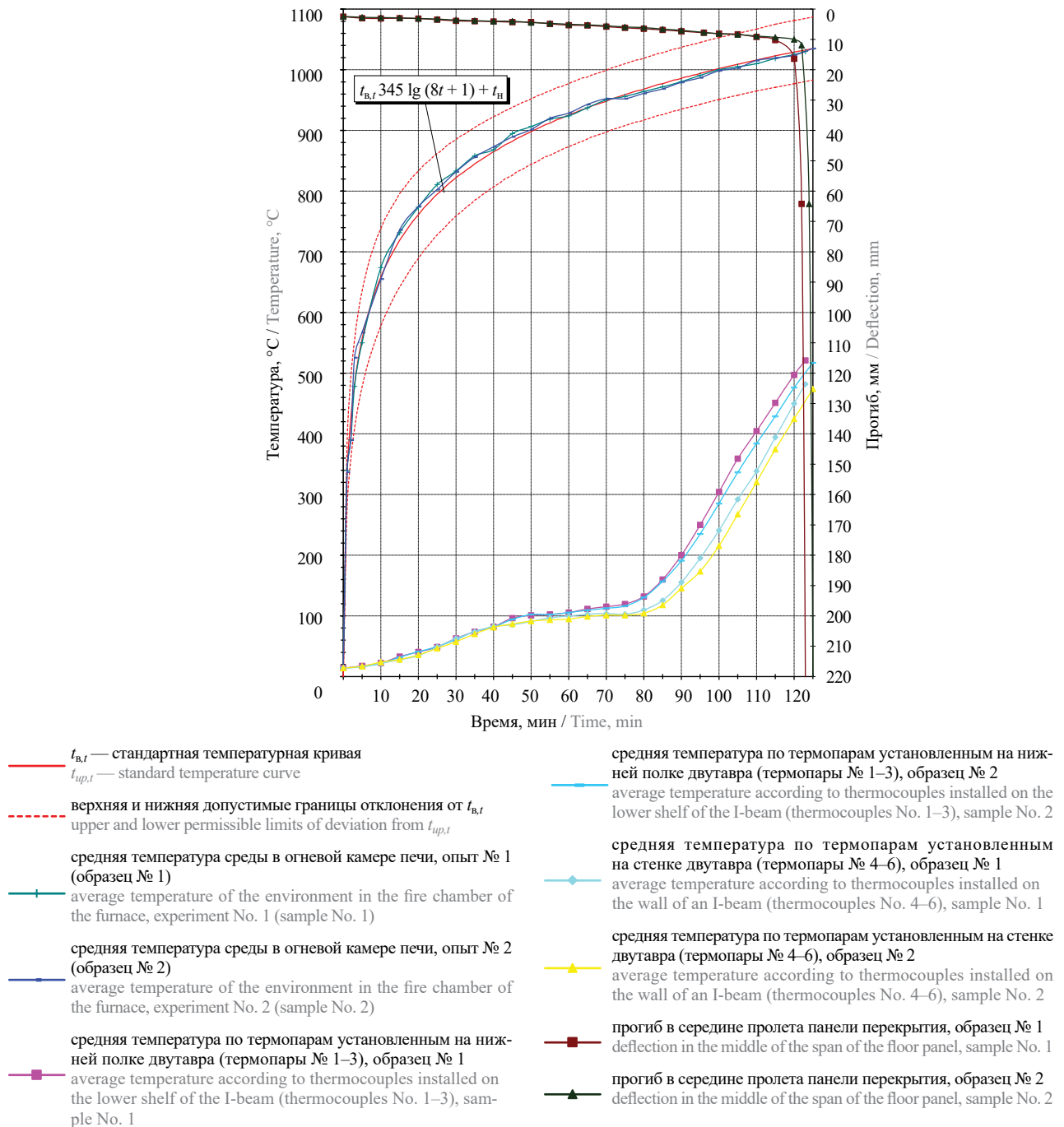
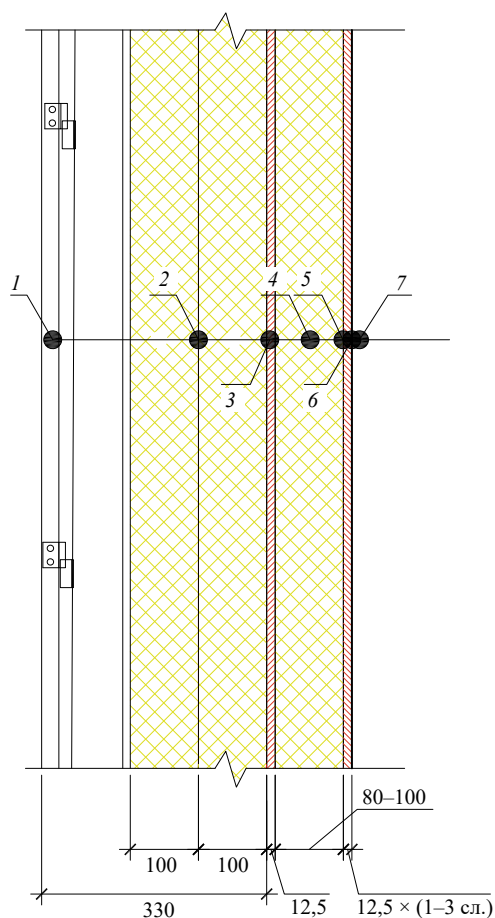


Рис. 5. Результат испытаний на огнестойкость стальной двутавровой балки № 35Б1 АСЧМ 20-93 с 3-слойной обшивкой из листов ГВЛ⁴

Fig. 5. The result of fire resistance tests of a steel I-beam No. 35B1 ASFM 20-93 with a 3-layer sheathing of GFS⁴

⁴ Отчет ИЛ НИЦ ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России № 332-3.2 от 01.11.2017 г. об испытаниях на пожарную опасность «Огнестойкость стальной двутавровой балки № 35Б1 АСЧМ 20-93 с трехслойной огнезащитной облицовкой, выполненной из листов ГВЛ ГОСТ Р 51829–2001 толщиной 3 × 12,5 мм (общая толщина облицовки 37,5 мм) по стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей ТУ 1121-012-04001508–2011» ООО «Кнауф гипс Челябинск» / А.В. Пехотников, В.В. Павлов. 19 л.



1 — вентилируемый фасад либо декоративная штукатурка с силикатной окраской по сетке из стеклоткани;
2 — плиты утеплителя из каменной ваты типа ROCKWOOL (либо аналог), толщина и плотность определяется по теплотехническому расчету, а также зависит от материала отделки;

3 — цементная плита АКВАПАНЕЛЬ Knauf (либо аналог) 12,5 мм;

4 — стальной каркас, защищенный от коррозии согласно ГОСТ 21.513–83 из прямоугольных профилей, плотно вложенные между стальным остовом минераловатные плиты Rockwool Акустик Баттс 80–100 мм в зависимости от расчетных требований к сечению профиля;

5 — пароизоляционная пленка 0,5 мм;

6 — 1, 2, 3 слоя ГВЛВ (ГОСТ Р 51829) толщиной по 12,5 мм в зависимости от требований к огнестойкости конструкции соответственно 45, 90, 120 мин, наружный слой ГВЛВ можно заменить на гипсокартонные (ГКЛО) плиты — 12,5 мм;

7 — стеклообои — настенное покрытие с дисперсной покраской (керамическая плитка на плиточном клее) 2–10 мм

1 — ventilated facade or decorative plaster with silicate coloring on a grid of fiberglass;

2 — insulation boards made of rock wool type ROCKWOOL (or equivalent) thickness and density is determined by thermal engineering calculation, and also depends on the finishing material;

3 — cement board AQUAPANEL Knauf (or equivalent) 12.5 mm;

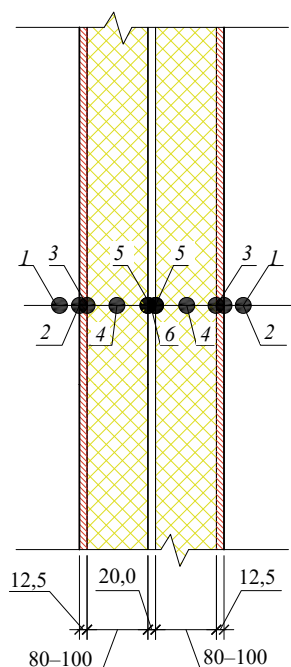
4 — steel frame, protected from corrosion according to GOST 21.513–83 from rectangular profiles, Rockwool Acoustic Butts 80–100 mm mineral wool boards tightly nested between the steel frame, depending on the design requirements for the profile section;

5 — vapor barrier film 0.5 mm;

6 — 1, 2, 3 GFS layer (GOST R 51829) with a thickness of 12.5 mm, depending on the requirements for fire resistance of the structure, respectively 45, 90, 120 min, the outer layer of GFS can be replaced with plasterboard (GPB) plates 12.5 mm;

7 — glass fiber — wall covering with dispersion painting (ceramic tiles on tile adhesive) 2–10 mm

Рис. 6. Конструкция наружной стены с пределами огнестойкости RE 45, RE 90, RE 120 и классом пожарной опасности K0
Fig. 6. Exterior wall construction with fire resistance limits RE 45, RE 90, RE 120 and fire class K0



1 — стеклообои — настенное покрытие с дисперсной покраской (керамическая плитка на плиточном клее) 2–10 мм;

2 — 1, 2, 3 слоя ГВЛВ (ГОСТ Р 51829) толщиной по 12,5 мм в зависимости от требований к огнестойкости конструкции соответственно 45, 90, 120 мин, наружный слой ГВЛВ можно заменить на гипсокартонные (ГКЛО) плиты — 12,5 мм;

3 — пароизоляционная пленка — 0,5 мм;

4 — стальной каркас, защищенный от коррозии, согласно ГОСТ 21.513–83, из прямоугольных профилей, плотно вложенные между стальным остовом миниплиты Rockwool Акустик Баттс — 80 мм;

5 — термоусадочная пленка, плотность — 200 мк;

6 — слой воздуха до оси конструкции, 20 мм

1 — glass fiber — wall covering with dispersed painting (ceramic tiles on tile adhesive) 2–10 mm;

2 — 1, 2, 3 — layers of GFS (GOST R 51829) 12.5 mm thick, depending on the requirements for fire resistance of the structure, respectively 45, 90, 120 minutes, the outer layer of GFS can be replaced with plasterboard (GPB) plates — 12.5 mm;

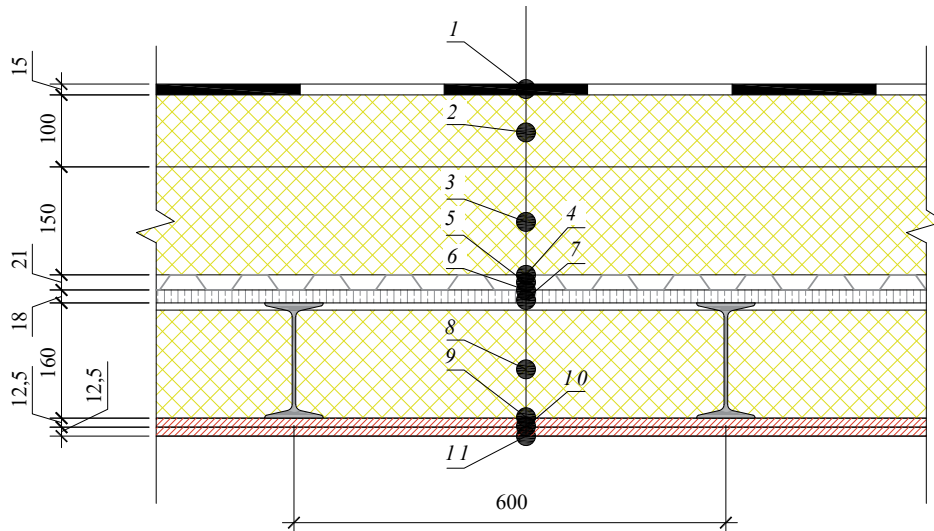
3 — vapor barrier film — 0.5 mm;

4 — steel frame protected against corrosion according GOST 21.513–83 from rectangular profiles, tightly nested between the steel frame of the Rockwool Acoustic Butts — 80 mm miniplate;

5 — shrink film density — 200 microns;

6 — air layer up to the axis of the structure, 20 mm

Рис. 7. Конструкция внутренней стены с пределами огнестойкости R 45, R 90, R 120 и классом пожарной опасности K0
Fig. 7. Internal wall structure with fire resistance R 45, R 90, R 120 and fire hazard class K0



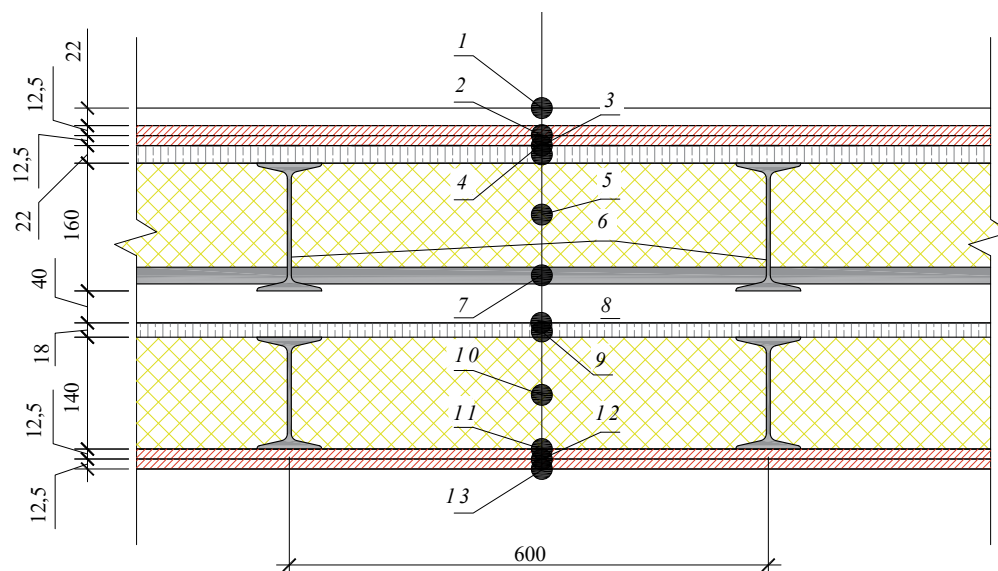
- 1 — гидроизоляция ПВХ мембрана 1,5 мм;
 2 — разуклонка кровли из минераловатных плит утеплителя из каменной ваты типа ROCKWOOL (либо аналог), толщина и плотность определяется по теплотехническому расчету;
 3 — минераловатные плиты утеплителя из каменной ваты типа ROCKWOOL (либо аналог), толщина и плотность определяется по теплотехническому расчету;
 4 — пароизоляция;
 5 — профлист С21–22 мм;
 6 — транспортная кровельная мембрана — 3 мм;
 7 — плиты OSB (ориентированно-стружечные) — 18 мм;
 8 — стальной каркас, защищенный от коррозии согласно ГОСТ 21.513–83, из прямоугольных профилей (140 мм) — 160 мм, плотно вложенные между стальным остовом минераловатные плиты Rockwool Акустик Баттс;
 9 — пароизоляционная пленка — 0,5 мм;
 10 — 1, 2, 3 слоя ГВЛВ (ГОСТ Р 51829) толщиной по 12,5 мм в зависимости от требований к огнестойкости конструкции соответственно 45, 90, 120 мин, наружный слой ГВЛВ можно заменить на гипсокартонные (ГКЛЮ) плиты — 12,5 мм;
 11 — стеклообои, покрытие с дисперсной покраской или подвесной потолок
- 1 — waterproofing PVC membrane 1.5 mm;
 2 — sloping of the roof from mineral wool slabs of stone wool insulation of the ROCKWOOL type (or equivalent) thickness and density are determined by thermal engineering calculation;
 3 — mineral wool insulation boards made of rock wool of the ROCKWOOL type (or equivalent), thickness and density are determined by thermal engineering calculation;
 4 — vapor barrier;
 5 — profiled sheet C21–22 mm;
 6 — transport roofing membrane — 3 mm;
 7 — OSB boards (oriented strand) — 18 mm;
 8 — steel frame protected against corrosion according GOST 21.513–83 from rectangular profiles (140 mm) — 160 mm, Rockwool Acoustic Butts mineral wool boards tightly nested between the steel frame;
 9 — vapor barrier film — 0.5 mm;
 10 — 1, 2, 3 GFS layer (GOST R 51829) with a thickness of 12.5 mm, depending on the requirements for fire resistance of the structure, respectively 45, 90, 120 minutes, the outer layer of GFS can be replaced with plasterboard (GPB) plates — 12.5 mm;
 11 — glass fiber coating with dispersed painting or suspended ceiling

Рис. 8. Конструкция покрытия с мягкой кровлей с пределами огнестойкости R 45, R 90, R 120 и классом пожарной опасности K0
Fig. 8. Roof structure with soft roof with fire resistance R 45, R 90, R 120 and fire hazard class K0

няться следующие проектные решения⁵: обшивки стен (с обеих сторон для внутренних стен, для наружных стен со стороны помещения) выполняются двухслойными и состоят из двух слоев плит КНАУФ — Файерборд толщиной по 24 мм, при этом слой утеплителя в конструкциях должен быть из минеральной каменной ваты плотностью не менее 45 кг/м³.

По результатам проведенных экспериментальных исследований и огневых испытаний установлено, что рассматриваемые типовые строительные конструкции системы ОБМС удовлетворяют требованиям по несущей способности (R), целостности (E) и теплоизолирующей способности (I), предъявляемым к несущим элементам зданий II степени огнестойкости.

⁵ КНАУФ. URL: <https://www.knauf.ru/documents/otchetyizakljuchenija/index.php#vp1431752>



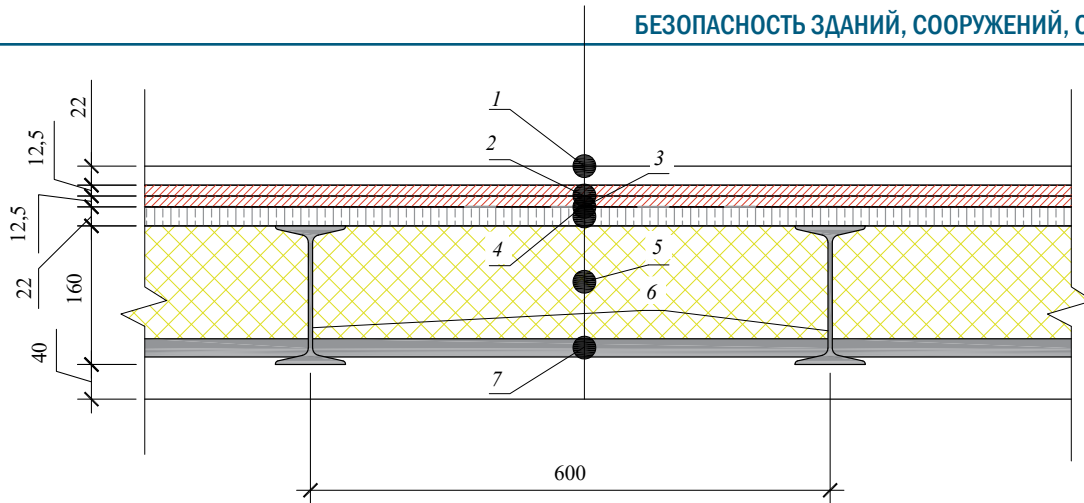
- 1 — линолеум гетерогенный — 3 мм (керамогранитная плитка на плиточном клею — 20 мм);
 2 — 2, 3 слоя ГВЛВ (ГОСТ Р 51829) толщиной по 12,5 мм в зависимости от требований к огнестойкости конструкции соответственно 90, 120 мин, наружный слой ГВЛВ при наличии полового покрытия из плитки можно не устанавливать;
 3 — прокладка из неопрена — 5 мм;
 4 — пароизоляционная пленка — 1 слой 0,2 мм;
 5 — OSB древесно-стружечная плита — 22 мм;
 6 — стальной каркас пола из двутавровых профилей 160 мм (главная балка из прямоугольного профиля высотой 200 мм), плотно вложенные между стальным остовом минплиты Rockwool Акустик Баттс;
 7 — профлист С21 — 22 мм;
 8 — транспортная кровельная мембрана — 3 мм;
 9 — OSB древесно-стружечная плита — 18 мм;
 10 — стальной каркас потолка из двутавровых профилей 140 мм (главная балка из прямоугольного профиля высотой 160–180 мм), плотно вложенные между стальным остовом минплиты Rockwool Акустик Баттс;
 11 — пароизоляционная пленка 1 слой — 0,2 мм;
 12 — 1, 2, 3 слоя ГВЛВ (ГОСТ Р 51829) толщиной по 12,5 мм в зависимости от требований к огнестойкости конструкции соответственно 45, 90, 120 мин, наружный слой ГВЛВ можно заменить на гипсокартонные (ГКЛЮ) плиты — 12,5 мм;
 13 — стеклообои, покрытие с дисперсной покраской или подвесной потолок
- 1 — heterogeneous linoleum — 3 mm (porcelain tiles on tile adhesive — 20 mm);
 2 — 2, 3 layers of GFS (GOST R 51829) with a thickness of 12.5 mm, depending on the requirements for fire resistance of the structure, respectively 90, 120 minutes, the outer layer of GFS in the presence of a floor covering of tiles cannot be installed;
 3 — neoprene padding — 5 mm;
 4 — vapor barrier film — 1 layer 0.2 mm;
 5 — OSB chipboard — 22 mm;
 6 — steel frame of the floor from profiles 160 mm (main beam from a rectangular profile 200 mm high), Rockwool Acoustic Butts mini — plates tightly nested between the steel frame;
 7 — profiled sheet C21 — 22 mm;
 8 — transport roofing membrane — 3 mm;
 9 — OSB chipboard — 18 mm;
 10 — steel frame of the ceiling from profiles 140 mm (main beam from a rectangular profile 160–180 mm high), Rockwool Acoustic Butts — slabs tightly nested between the steel frame;
 11 — vapor barrier film 1 layer — 0.2 mm;
 12 — 1, 2, 3 GFS layer (GOST R 51829) with a thickness of 12.5 mm, depending on the requirements for fire resistance of the structure, respectively 45, 90, 120 minutes, the outer layer of GFS can be replaced with plasterboard (GPB) plates — 12.5 mm;
 13 — glass fiber coating with dispersed painting or suspended ceiling

Рис. 9. Конструкция междуэтажного перекрытия с пределами огнестойкости REI 45, REI 90, REI 120 и классом пожарной опасности К0

Fig. 9. Interfloor construction with fire resistance limits REI 45, REI 90, REI 120 and fire hazard class K0

Обоснование классов пожарной опасности строительных конструкций ОБМС сделано на основе анализа результатов проведенных во ВНИИПО огневых испытаний строительных конструкций с обшивками

и подшивками из плитных и листовых материалов типа ГВЛ (ГКЛЮ, ЦСП) [23]. В ходе испытаний установлено, что при одностороннем температурном воздействии листы ГВЛ и их аналоги (отнесен-



- 1 — линолеум гетерогенный — 3 мм (керамогранитная плитка на плиточном клею — 20 мм);
 2 — 2, 3 слоя ГВЛВ (ГОСТ Р 51829) толщиной по 12,5 мм в зависимости от требований к огнестойкости конструкции соответственно 90, 120 мин, наружный слой ГВЛВ при наличии полового покрытия из плитки можно не устанавливать;
 3 — прокладка из неопрена — 5 мм;
 4 — пароизоляционная пленка — 1 слой 0,2 мм;
 5 — OSB древесно-стружечная плита — 22 мм;
 6 — стальной каркас пола из двутавровых профилей 160 мм (главная балка из прямоугольного профиля высотой 200 мм), плотно вложенные между стальным остовом минплиты Rockwool Акустик Баттс;
 7 — профлист С21 — 22 мм
- 1 — heterogeneous linoleum — 3 mm (porcelain tiles on tile adhesive — 20 mm);
 2 — 2, 3 layers of GFLB (GOST R 51829) with a thickness of 12.5 mm, depending on the requirements for fire resistance of the structure, respectively 90, 120 minutes, the outer layer of GFLB in the presence of a floor covering of tiles cannot be installed;
 3 — neoprene padding — 5 mm;
 4 — vapor barrier film — 1 layer 0.2 mm;
 5 — OSB chipboard — 22 mm;
 6 — steel frame of the floor from profiles 160 mm (main beam from a rectangular profile 200 mm high), Rockwool Acoustic Butts mini — plates tightly nested between the steel frame;
 7 — profiled sheet C21 — 22 mm

Рис. 10. Конструкция основания (перекрытия) с пределами огнестойкости REI 45, REI 90, REI 120 и классом пожарной опасности К0

Fig. 10. Base (ceiling) structure with fire resistance limits REI 45, REI 90, REI 120 and fire hazard class K0

ные к материалам группы горючести Г1) в составе конструкции ведут себя как негорючий материал и не дают значительного теплового эффекта.

Наличие внутри рассматриваемых конструкций негорючих утеплителей, отнесенных к материалам класса КМ0 (негорючие — НГ), является положительным фактором, препятствующим скрытому распространению пламени по конструкциям.

Таким образом, на основании анализа результатов огневых испытаний, а также проведенных испытаний на пожарную опасность аналогичных по конструкции ограждений, установлено, что класс пожарной опасности рассматриваемых конструкций при условии выполнения обшивок стен, подшивок и настилов перекрытий из плитных и листовых материалов проектного типа составит:

- для конструкции межэтажных и чердачных перекрытий, а также покрытий — К0 (45);
- для наружных стен с внутренней стороны и внутренних стен лестничных клеток (перегородок) — К0 (45);

- для наружных стен (без учета фасадных систем) с внешней стороны — К0.

Экспериментальное подтверждение огнестойкости описываемых конструкций проведено специалистами ФГБУ ВНИИПО МЧС России совместно со ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России». В ходе исследований разработаны программы и проведен комплекс огневых испытаний узлов и конструкций, входящих в систему ОБМС, и аналогичных систем с металлическим каркасом. Результаты испытаний, отраженные в отчетах, протоколах испытаний и заключениях ВНИИПО, подтвердили требуемые пределы огнестойкости и классы пожарной опасности конструкций модульной системы ОБМС.

Анализ конструкций системы ОБМС и аналогичных систем, проведенный специалистами Академии ГПС МЧС России, также подтвердил их требуемые пределы огнестойкости и классы пожарной опасности, что отражено в заключениях и протоколах испытаний.

На основе результатов расчетов и огневых испытаний, а также имеющегося опыта проектирования

разработаны конструктивные решения для системы ОБМС с различными пределами огнестойкости, основные из которых представлены на рис. 6–10.

Разработанными и реализованными на практике проектами конструкция модуля предусмотрена как балочно-стоечная система из стальных профилей различного сечения.

Конструкции стен и перекрытий примыкают и крепятся между собой при помощи сварки. Крепеж элементов обшивки строительных конструкций между собой производится посредством соединений, выполняемых при помощи самонарезающих шурупов, и осуществляется через соединительные элементы и закладные детали, в соответствии с технической документацией изготовителя.

Узлы соединений, включая крепежные элементы, закрываются от воздействия огня обшивками (подшивками) из листов ГВЛ (ГКЛО и др.), слоем минераловатного утеплителя. Крепление ГВЛ (ГКЛО и др.) к конструкции осуществляется при помощи пристреливаемых гвоздевых соединений и стальных скоб в комбинации с клеевым соединением.

Соединение модулей (объемных блоков) между собой происходит при помощи накладных пластин, которыми блоки свариваются между собой.

Конструкция модульных блоков устанавливается на фундамент. Фундамент для таких зданий может быть различной конструкции (плитный, ленточный, свайный с ленточным или плитным ростверком).

Выводы

Специфической особенностью конструктивной системы ОБМС является то, что ее отдельные несущие элементы расположены внутри ограждающих конструкций здания — наружных стен, покрытий, внутренних стен и перегородок и т.д.

Положениями № 123-ФЗ и нормативных документов в области пожарной безопасности не установлены требования к пределам огнестойкости элементов подобных систем, требования к огнестойкости узлов крепления и примыкания, а также требования к классам их пожарной опасности.

С учетом этого проведены аналитические исследования, позволившие обосновать требования к пределам огнестойкости межэтажных перекрытий, бесчердачных покрытий, наружных стен, внутренних стен лестничных клеток, противопожарных преград и т.д. для зданий II степени огнестойкости класса С0.

Данные требования носят комбинированный характер, т.е. содержат минимально необходимые и отличные друг от друга по численному значению требования по признакам R, а также по E и I для каждой конструкции и позволяют в сочетании с разработанными требованиями к узлам крепления обеспечить общую прочность и пространственную

устойчивость конструктивной системы, а также предотвратить прогрессирующее (лавинообразное) разрушение конструкций, находящихся за пределами очага пожара.

Разработанные комбинированные требования по огнестойкости к узлам примыкания и классу пожарной опасности конструкций обеспечивают ограничение распространения пожара в стыковых соединениях, по поверхности конструкций, а также внутри них.

Обоснование конструктивных решений по обеспечению требуемых пределов огнестойкости и классов пожарной опасности конструкций ОБМС базировалось на результатах расчетов и огневых испытаний. При этом учитывалось, что для конструкций ОБМС наиболее целесообразно применение огнезащитной теплоизоляция, устраиваемой сухим способом с применением обшивных гипсоволокнистых плит и/или других видов плитных материалов.

В каркасе ОБМС наиболее слабыми с точки зрения огнестойкости элементами являются металлические конструкции с приведенной толщиной около 4 мм.

Анализ результатов расчетов прогрева стальных конструкций с огнезащитой плитами ГВЛ показал, что для стальных конструкций, имеющих минимальную приведенную толщину металла не менее 3,5 мм, для обеспечения предела огнестойкости R 90 необходима его двухслойная обшивка из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм каждый, а для обеспечения предела огнестойкости R 120 стальных конструкций, имеющих минимальную приведенную толщину металла не менее 3,5 мм, необходима их трехслойная обшивка из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм каждый.

С учетом этого в конструкциях ОБМС предусмотрено использование несущих металлических элементов с приведенной толщиной металла не менее 3,5 мм.

При этом для зданий II степени огнестойкости класса С0 в качестве огнезащиты стальных элементов несущих каркасов здания должны быть предусмотрены двухслойные обшивки из листов ГВЛ (ГКЛО) толщиной по 12,5 мм каждый, а также слой теплоизоляции из минеральной (каменной) ваты толщиной 100 мм, находящейся в составе (внутри) конструкций.

А для зданий I степени огнестойкости класса С0 в качестве огнезащиты стальных элементов несущих каркасов здания должны быть предусмотрены трехслойные обшивки из листов ГВЛ (ГКЛО) толщиной по 12,5 мм каждый, а также слой теплоизоляции из минеральной (каменной) ваты толщиной 100 мм, находящейся в составе (внутри) конструкций.

Огневые испытания подтвердили корректность принятых решений по обеспечению пределов огнестойкости и классов пожарной опасности конструкций ОБМС.

На основе исследований были разработаны и реализованы проекты противопожарной защиты

следующих модульных зданий различного функционального назначения:

- двухэтажное здание ОГБУЗ «Тулунская городская больница» в Иркутской области;
- двухэтажное здание детского сада на 120 мест п. Зеленоградский, МО;
- шестиэтажное здание гостиницы «HOLIDAY INN EXPRESS» в г. Воронеже;
- трехэтажные здания поликлиники и амбулатории в г. Симферополе;
- одноэтажное здание школы с дошкольным отделением в д. Индери Вагайского района Тюменской области;
- одноэтажное здание вокзала в г. Сосногорске и др.

На основе результатов исследований подготовлены предложения по дополнению свода правил СП 2.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты» требованиями к модульным зданиям по пределам огнестойкости и классам пожарной опасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованов В.И., Пронин Д.Г. Влияние развития нормативной базы в области огнестойкости на применение стали в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 10. С. 24–29. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.24-29
2. Гасиев А.А. Современное капитальное объемно-блочное строительство в России на основе универсальной объемно-блочной (модульной) системы с несущим металлическим каркасом // Жилищное строительство. 2020. № 10. С. 38–48. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-10-38-47
3. ТУ 25.11.10-001-02688615–2016. На производство модульных конструкций ООО «ПСК Прозрачный Мир».
4. СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты.
5. Mahale H.D., Kandekar S.B. Behaviour of steel structure under the effect of fire loading // Journal of Engineering Research and Applications. 2016. Vol. 6. Issue 5. Part 5. Pp. 42–46.
6. Behnam B. Structural response of vertically irregular tall moment — resisting steel frames under preand post — earthquake fire // The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2016. Vol. 25. Issue 12. Pp. 543–557. DOI: 10.1002/tal.1271
7. Behnam B. A scenario-based methodology for determining fire resistance ratings of irregular steel structures // Advances in Structural Engineering. 2019. Vol. 23. Issue 1. Pp. 89–103. DOI: 10.1177/1369433219864457
8. Akaa O., Abu A., Spearpoint M., Giovinnazzi S. Optimising design decision — making for steel structures in fire using a hybrid analysis technique // Fire Safety Journal. 2017. Vol. 91. Pp. 532–541. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.018
9. Md. Mofizul Islam, Rubieyat Bin Ali. Fire protection of steel structure: An overall review // World Scientific News. 2018. Vol. 102. Pp. 131–145.
10. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Оценка огнезащитной эффективности покрытий для стальных конструкций // Пожарная безопасность. 2020. № 4 (101). С. 43–54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004
11. Инструкции по расчету фактических пределов огнестойкости металлических конструкций. М. : ВНИИПО, 1983.
12. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Инженерный метод расчета огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой из минераловатных плит «RockwoolConlit» // Пожарная безопасность. 2006. № 4. С. 78–85.
13. Инструкция по расчету фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными облицовками из листов ГВЛ ГОСТ Р 51829–2001 по стальному каркасу из тонколистовых оцинкованных профилей ТУ 1121-012-04001508–2011. М. : ВНИИПО МЧС России, 2015. 33 л.
14. Nause P. Brandschutztechnische Bewertung tragender Bauteile im Bestand. -Brandschutz-Forum- München, 21.06.2013. 47 p. URL: <https://docplayer.org/2762246-Brandschutztechnische-bewertung-tragender-bauteile-im-bestand.html>
15. Fire protection for structural steel in buildings. URL: [https://docplayer.net/23624577-Fire-protection-for-structural\[1\]steel-in-buildings.html](https://docplayer.net/23624577-Fire-protection-for-structural[1]steel-in-buildings.html) (дата обращения: 24.03.2022).
16. Zhang Q. Durable spray — applied fire — resistive material for enhanced safety of steel structures : thesis submitted ... for the Degree of Doctor of Philosophy (Civil Engineering). Ann Arbor, 2015. 172 p.
17. Пехотиков А.В., Павлов В.В., Хасанов И.Р., Голованов В.И. Расчетные методики оценки огнестойкости и пожарной опасности строительных конструкций // Актуальные проблемы пожарной безопасности : тез. докл. XXX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Ногинск, 6–8 июня 2018 г.). Балашиха, 2018. С. 359–361.
18. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В., Пронин Д.Г. Стандартизация и внедрение расчетных методов в области огнезащиты несущих стальных конструкций // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 05–07 июня 2019 г.). Балашиха, 2019. С. 26–29.
19. Morovat M., Engelhardt M. A critical review of test methods for mechanical characterization of steel for structural — fire engineering applications // Journal of Structural Engineering. 2020; 146(11). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002787

20. Пронин Д.Г., Пехотиков А.В., Павлов В.В., Назмеева Т.В., Журавлев А.Ю. Особенности испытаний на огнестойкость строительных конструкций с применением холодногнутых оцинкованных профилей // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 10. С. 30–35. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.30-35
21. Gravit M., Golub E., Klementev B., Dmitriev I. Fire protective glass fiber reinforced concrete plates for steel structures under different types of fire exposure // Buildings. 2021. Vol. 11. Issue 5. P. 187. DOI: 10.3390/buildings11050187
22. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Огнезащита стальных конструкций плитным материалом PYRO – SAFE AESTUVER T // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 11. С. 8–16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16
23. Техническая информация (в помощь инспектору ГПН). М. : ВНИИПО, 2017. 24 с.

REFERENCES

1. Golovanov V.I., Pronin D.G. The impact of the development of the regulatory framework in the field of fire safety on the use of steel structures in construction. *Industrial and Civil Construction*. 2021; 10:24-29. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.24-29 (rus).
2. Gasiev A.A. Modern capital volume-block construction in Russia based on a universal volume-block (modular) system with a load-bearing metal frame. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo/Housing Construction*. 2020; 10:38-48. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-10-38-47 (rus).
3. TU 25.11.10-001-02688615–2016. For the production of modular structures of PSK Transparent World LLC. (rus).
4. SP 2.13130.2020. Fire protection systems. Ensuring the fire resistance of objects of protection. Change 1. (rus).
5. Mahale H.D., Kandekar S.B. Behaviour of steel structure under the effect of fire loading. *Journal of Engineering Research and Applications*. 2016; 6(5):42-46.
6. Behnam B. Structural response of vertically irregular tall moment — resisting steel frames under preand post — earthquake fire. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2016; 25(12):543-557. DOI: 10.1002/tal.1271
7. Behnam B. A scenario-based methodology for determining fire resistance ratings of irregular steel structures. *Advances in Structural Engineering*. 2019; 23(1):89-103. 10.1177/1369433219864457
8. Akaa O., Abu A., Spearpoint M., Giovinazzi S. Optimising design decision — making for steel structures in fire using a hybrid analysis technique. *Fire Safety Journal*. 2017; 91:532-541. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.018
9. Md. Mofizul Islam, Rubieyat Bin Ali. Fire protection of steel structure: An Overall Review. *World Scientific News*. 2018; 102:131-145.
10. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Evaluation of the fire — retardant efficiency of coatings for steel structures. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2020; 4(101):43-54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004 (rus).
11. *Instructions for calculating the actual limits of fire resistance of metal structures*. Moscow, VNIPO, 1983. (rus).
12. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Engineering method for calculating the fire resistance of steel structures with fire protection from mineral wool boards “RockwoolConlit”. *Fire safety*. 2006; 4:78-85. (rus).
13. Instructions for calculating the actual fire resistance limits of steel structures with fire — retardant linings made of GVL sheets GOST R 51829–2001 for a steel frame made of thin — sheet galvanized profiles TU 1121-012-04001508–2011. Moscow, VNIPO EMERCOM of Russia, 2015; 33. (rus).
14. Nause P. *Brandschutztechnische Bewertung tragender Bauteile im Bestand*. -Brandschutz-Forum- München, 21.06.2013; 47. URL: <https://docplayer.org/2762246-Brandschutztechnische-bewertung-tragender-bauteile-im-bestand.html>
15. *Fire protection for structural steel in buildings*. URL: [https://docplayer.net/23624577-Fire-protection-for-structural\[1\]steel-in-buildings.html](https://docplayer.net/23624577-Fire-protection-for-structural[1]steel-in-buildings.html) (accessed: 24.03.2022).
16. Zhang Q. *Durable Spray – Applied Fire – Resistive material for Enhanced Safety of Steel Structures : thesis submitted ... for the Degree of Doctor of Philosophy (Civil Engineering)*. Ann Arbor, 2015. 172.
17. Pekhotikov A.V., Pavlov V.V., Khasanov I.R., Golovanov V.I. Calculation methods for assessing the fire resistance and fire hazard of building structures. *Actual problems of fire safety : abstracts of the XXX International Scientific and Practical Conference (Noginsk, June 6–8, 2018)*. Balashikha, 2018; 359-361. (rus).
18. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V., Pronin D.G. Standardization and introduction of calculation methods in the field of fire protection of load — bearing steel structures. *Actual problems of fire safety : materials of the XXII International Scientific and Practical Conference (Moscow, June 5–7, 2019)*. Balashikha, 2019; 26-29. (rus).
19. Morovat M., Engelhardt M. A critical review of test methods for mechanical characterization of steel for structural — fire engineering applications. *Journal of Structural Engineering*. 2020; 146(11). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002787
20. Pronin D.G., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V., Nazmееva T.V., Zhuravlev A.Yu. Features of fire resistance tests of building structures using cold-formed galvanized profiles. *Industrial and Civil Construction*. 2021; 10:30-35. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.30-35 (rus).

21. Gravit M., Golub E., Klementev B., Dmitriev I. Fire protective glass fiber reinforced concrete plates for steel structures under different types of fire exposure. *Buildings*. 2021; 11(5):187. DOI: 10.3390/buildings11050187
22. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Fire protection of steel structures with slab material PYRO-SAFE AESTUVER T. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(11):8-16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16 (rus).
23. *Technical information (to help the inspector of the GPN)*. Moscow, VNIPO, 2017; 24. (rus).

Поступила 03.04.2023, после доработки 08.06.2023;

принята к публикации 27.06.2023

Received April 3, 2023; Received in revised form June 8, 2023;

Accepted June 27, 2023

Информация об авторах

ГАСИЕВ Азамат Абдуллахович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; начальник отдела «Строительных экспертиз» Департамента строительно-технической экспертизы, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации», Россия, 119331, г. Москва, пр-т Вернадского, 29; ORCID: 0000-0002-7036-8594; e-mail: gasiev@bk.ru

ПАВЛОВ Владимир Валерьевич, начальник сектора огнестойкости конструкций, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 760824; ORCID: 0000-0002-0629-5765; e-mail: vv.pavlov@mail.ru

ГОМОЗОВ Александр Васильевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomozovav@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Azamat A. GASIEV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the Department of Construction Expertise of Construction and Technical Expertise Department, Federal State Budgetary Institution "Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation", Vernadsky Ave., 29, Moscow, 119331, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7036-8594; e-mail: gasiev@bk.ru

Vladimir V. PAVLOV, Head of Sector, All Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760824; ORCID: 0000-0002-0629-5765; e-mail: vv.pavlov@mail.ru

Alexander V. GOMOZOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9660-9221, e-mail: Gomozovav@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Роботизированные установки пожаротушения. Параметры эффективного тушения

Юрий Иванович Горбань¹✉, Сергей Георгиевич Немчинов¹, Сергей Георгиевич Цариченко², Аристарх Альбертович Туровский¹

¹ ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР», г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Появление пожарных роботизированных стволов (ПРС), составляющих основу роботизированных установок пожаротушения (РУП), значительно расширило функциональные возможности ствольной пожарной техники, применяемой при тушении пожаров, и, соответственно, повлияло на параметры тушения. Целью статьи является обоснование параметров эффективного тушения РУП.

Параметры эффективного тушения. Основное преимущество РУП заключается в обнаружении очага возгорания в ранней стадии и тушении его всем расходом огнетушащего вещества (ОТВ) путем адресной подачи на очаг возгорания струи ОТВ по баллистической траектории. При этом создается высокая интенсивность орошения, позволяющая быстро ликвидировать очаг возгорания, что значительно повышает эффективность пожаротушения и снижает ущерб от пожара. Нормы для традиционных автоматических установок пожаротушения (АУП) включают в себя нормативные параметры тушения по интенсивности орошения i_n , общему расходу Q_n и времени тушения t_n . Тушение на площади S_f производится при постоянной нормативной интенсивности орошения i_n , при этом расход на тушение Q_f будет величиной переменной, зависящей от площади тушения. Особенностью РУП, в отличие от традиционных АУП, является то, что расход является величиной постоянной, а интенсивность орошения и время тушения — величинами переменными. В статье рассмотрено влияние отличительных особенностей РУП на параметры тушения, актуальные проблемы эффективного применения РУП и дано обоснование оптимальных параметров РУП с учетом дифференцированного подхода применительно к РУП. Приводятся расчетные данные по фактическим параметрам пожаротушения РУП с учетом оценки по фактическим результатам испытаний. Показана возможность алгоритмизации работы РУП (останов тушения и проверки качества тушения) исходя из условия локализации и ликвидации возгорания на ранней стадии развития пожара.

Выводы. Совершенствование технических средств и алгоритмов работы РУП позволяет провести пересмотр имеющихся параметров тушения с введением новых параметров. Применение новых параметров РУП значительно повысит эффективность по таким показателям как уменьшение расхода, сокращение времени тушения, уменьшение ущерба от пожара.

Ключевые слова: расход; интенсивность; время развития пожара; время тушения; быстроедействие; площадь пожара; площадь орошения; роботизированные пожарные стволы

Для цитирования: Горбань Ю.И., Немчинов С.Г., Цариченко С.Г., Туровский А.А. Роботизированные установки пожаротушения. Параметры эффективного тушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 58–67. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.58-67

✉ Горбань Юрий Иванович, e-mail: info@efer.pro

Robotic fire-extinguishing systems. Effective extinguishing parameters

Yuriy I. Gorban¹✉, Sergey G. Nemchinov¹, Sergey G. Tsarichenko², Aristarch A. Turovskiy¹

¹ “Engineering Centre of Fire Robots Technology “FR” LLC, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The emergence of robotic fire monitors (RFM), which form the basis of robotic fire suppression systems (RFSS), has significantly expanded the functionality of fire monitors used in extinguishing fires, and, accordingly, affected the extinguishing parameters. The purpose of the article is to substantiate the parameters of effective fire suppression by RFSS.

Effective extinguishing parameters. Firefighting monitors are used for extinguishing most of the fires. The development of robotic fire monitors (RFM) has significantly expanded the functionality of technology, which has become the basis of robotic fire suppression systems (RFSS).

The main advantage of the RFSS is the ability to detect the source of ignition at an early stage and extinguish it with the entire flow of the fire extinguishing agent (FEA) by targeted supply of a jet of FEA to the source of ignition along a ballistic trajectory. This creates a high intensity of irrigation, which allows a quick elimination of the source of fire, which significantly increases the efficiency of fire extinguishing and reduces damage from fire. Standards for traditional automatic fire suppression systems (AFSS) include standard extinguishing parameters for irrigation intensity i_n , total flow rate Q_n and extinguishing time t_n . Extinguishing on the area S_t is carried out at a constant normative intensity of irrigation i_n , while the flow rate of extinguishing Q_t will be a variable value depending on the extinguishing area. A feature of RFSS, in contrast to traditional AFSS, is that the flow rate is a constant value, and the irrigation intensity and extinguishing time are variable values. The article considers the influence of the distinctive features of the RFSS on the extinguishing parameters, the actual issues of the effective application of the RFSS, and provides a rationale for the optimal parameters of the RFSS, taking into account a differentiated approach in relation to the RFSS. The calculated data are given on the actual parameters of fire extinguishing of the RFSS, taking into account the assessment based on the actual test results. The possibility of algorithmization of the operation of the RFSS (stopping the extinguishing and checking the quality of the extinguishing) based on the condition of localization and elimination of fire at an early stage of fire development is shown.

Conclusions. Improving the technical means and algorithms for the operation of the RFSS allows to review the existing extinguishing parameters with the including of new parameters. The use of new parameters of the RFSS will significantly increase efficiency in terms of such as reducing flow rate, reducing extinguishing time, and reducing damage from a fire.

Keywords: flow rate; intensity; fire spreading time; extinguishing time; performance; fire area; irrigation area; robotic fire monitors

For citation: Gorban Yu.I., Nemchinov S.G., Tsarichenko S.G., Turovskiy A.A. Robotic fire-extinguishing systems. Effective extinguishing parameters. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4):58-67. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.58-67 (rus).

✉ Yuriy Ivanovich Gorban, e-mail: info@efer.pro

Введение

Повышение эффективности пожаротушения — приоритетная задача пожарного дела. Ствольная пожарная техника — самая массовая и наиболее применяемая техника для тушения пожаров. Пожарные роботизированные стволы (ПРС) значительно расширили функциональные возможности ствольной техники и стали основой роботизированных установок пожаротушения (РУП)¹. Основные понятия, устройство и область применения РУП представлены в монографии [1], в статьях [2, 3], а тенденции развития пожарной робототехники в России в статьях [4, 5] и в других странах в статьях [6–8].

Принцип действия РУП заключается в обнаружении очага возгорания на ранней стадии и тушении его всем расходом огнетушащего вещества (ОТВ) путем адресной подачи на очаг возгорания струи ОТВ по баллистической траектории, что отражено в известных публикациях [9, 10] и изобретениях^{2,3} [11].

РУП создают высокую интенсивность орошения, позволяющую быстро ликвидировать очаг

возгорания, что значительно повышает эффективность пожаротушения и снижает ущерб от пожара. Высокие технические показатели и большие функциональные возможности РУП позволили широко применять их для защиты значимых объектов страны, что отражено в монографии [1]. К работам по роботизированным установкам пожаротушения в нашей стране проявлен интерес и в зарубежных странах [12–14].

Нормативные документы для РУП в общем виде представлены в своде правил для автоматических установок пожаротушения (АУП) СП 485.1311500.2020⁴ и, конкретно для РУП производства компании ЭФЭР, в ведомственных нормах ВНПБ 39–20⁵. Известны также стандарты США FM 142.1 для лафетных стволов с программным управлением⁶. В общепринятых стандартах даны нормативные параметры тушения по интенсивности орошения i_n , к общему расходу Q_n и времени тушения t_n . Тушение на площади S_t производится при постоянной нормативной интенсивности орошения i_n , при этом расход на тушение Q_t

¹ ГОСТ Р 53326–2009. Техника пожаротушения. Установки пожаротушения роботизированные. Общие технические требования. Методы испытаний. Введ. 01.01.2010 г. М.: Стандартинформ, 2009.

² Пат. 2128536. Российская Федерация. МПК А62С 37/00 (1995.01). Роботизированная установка пожаротушения / Горбань Ю.И. № 97101104/12; заявл. 22.01.1997; опубл. 10.04.1999.

³ А.с. 370950 СССР. МПК А62С 37/04 (2000.01). Устройство для наведения огнетушащей струи на очаг пожара / Меишман Л.М. № 1488694/29–14; заявл. 02.11.1970; опубл. 22.11.1973. Бюл. № 12.

⁴ СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования: приказ МЧС России от 31.08.2020 № 628. Введ. 01.03.2021.

⁵ ВНПБ 39–20. Роботизированная установка пожаротушения. Нормы и правила проектирования. М.: ВНИИПО МЧС России, 2020. 65 с.

⁶ FM 142.1. Approval Standard for Fire Protection Monitor Assemblies. FM Approvals LLC, 2018. 28 p.

будет величиной переменной, зависящей от площади тушения:

$$Q_T = i_n S_T \text{ при } i_n = \text{const.} \quad (1)$$

Отличительной особенностью РУП от традиционных АУП является то, что расход является величиной постоянной, а интенсивность орошения и время тушения — величинами переменными.

В связи с тем, что нормы для традиционных АУП не учитывают особенности РУП и не позволяют эффективно использовать технические возможности РУП, вопрос определения параметров эффективного тушения РУП является актуальным. Сравнительные оценки РУП и традиционных спринклерных АУП приведены в статье [15].

Целью данной статьи является определение параметров эффективного тушения РУП с учетом дифференцированного подхода, учитывающего технические возможности РУП, обоснование этих параметров, рассмотрение методики расчетов и критериев оценки эффективности тушения РУП.

Введение новых параметров для РУП, которые в настоящее время не отражены в действующих нормах для установок пожаротушения в достаточной мере, позволит наиболее полно использовать значительное преимущество РУП по сокращению времени тушения, уменьшению общего расхода и снижению ущерба от пожара.

Основные параметры тушения РУП

Рассмотрим основные понятия, определения, исследованные факты по параметрам тушения РУП, а также проанализируем закономерности, которые должны быть соблюдены при постановке задач и обосновании показателей.

Расход и средняя интенсивность орошения

Согласно ГОСТ Р 53326¹, для РУП введены параметры тушения, в которых общий расход РУП определяется номинальным расходом $Q_{\text{ном}}$ ПРС, которым производится тушение, а интенсивность орошения — средней интенсивностью орошения $i_{\text{ср}}$, получаемой при орошении строчным сканированием, определяемой как отношение расхода $Q_{\text{ном}}$ ПРС, с учетом коэффициента потерь K при подаче ОТВ, к площади тушения S_T :

$$i_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ном}} \cdot K}{S_T} \text{ при } Q_{\text{ном}} = \text{const.} \quad (2)$$

Из формулы видно, что при постоянном расходе $Q_{\text{ном}}$ средняя интенсивность орошения $i_{\text{ср}}$ меняется в зависимости от площади тушения S_T .

Средняя интенсивность орошения $i_{\text{ср}}$ по ГОСТ Р 53326¹ должна быть не менее нормативной интен-

сивности орошения i_n , установленной для дренчерных установок пожаротушения:

$$i_{\text{ср}} \geq i_n. \quad (3)$$

Если во всей защищаемой зоне интенсивность орошения $i_{\text{ср}}$ больше i_n , то расход может быть уменьшен до величины, при которой соблюдается условие (3), учитывая, что в соответствии с Федеральным законом от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее — Технический регламент) главным требованием для АУП является соблюдение нормативной интенсивности орошения i_n на всей защищаемой площади. Расход $Q_{\text{ном}}$ ПРС при этом будет меньше или равен нормативному расходу Q_n , установленному СП 485.1311500.2020⁴:

$$Q_{\text{ном}} \leq Q_n. \quad (4)$$

Требуемый объем ОТВ

При тушении объем ОТВ V_T должен быть меньше или равен нормативному объему ОТВ V_n на площади тушения S_T :

$$V_T \leq V_n. \quad (5)$$

Нормативный объем ОТВ V_n на площади тушения S_T рассчитывается по нормативной интенсивности орошения i_n за нормативное время t_n по аналогии с методикой расчета ОТВ при выездах на пожары⁷ и в соответствии с действующими ТУ на РУП, Приложение Г⁸:

$$V_n = i_n \cdot S_T \cdot t_n. \quad (6)$$

Время тушения

Расчетный параметр по времени тушения t_T для РУП является величиной переменной и определяется по нормативному объему V_n на площади тушения S_T , см. ТУ на РУП, Приложение Г⁸:

$$t_T = \frac{V_n}{Q_{\text{ном}}}. \quad (7)$$

Этот параметр характеризует быстродействие тушения, является показателем эффективности пожаротушения.

Через время тушения t_T , установленное для площади S_T , и при отсутствии горения, подтвержденное РУП, вводится останов тушения.

⁷ Методика проведения пожарно-тактических расчетов. Интернет-проект Fireman.club. URL: taty-polzovateley/metodika-provedeniya-pozharno-takticheskix-raschetov/ (дата обращения: 15.06.2023).

⁸ ТУ 4854-005-16820082-2005, с Изм. 5 2021 г. Роботизированные установки пожаротушения.

При этом обеспечивается непрерывный поиск очага возгорания в контролируемой зоне. При появлении повторного возгорания или выявлении второго очага осуществляется его тушение. При этом общая длительность тушения в зависимости от наличия очага возгорания по времени должна быть не менее нормативного времени тушения t_n по СП 485.1311500.2020⁴.

Время развития пожара до начала тушения

Время свободного развития пожара, мин, до начала тушения $t_{св}$ для пожарных расчетов⁷ включает в себя:

$$t_{св} = t_{обн} + t_c + t_{сб} + t_{сл} + t_{б,р}, \quad (8)$$

где $t_{обн}$ — время развития пожара с момента его возникновения до момента его обнаружения (2 мин — при наличии АПС или АУП; 2–5 мин — при наличии круглосуточного дежурства, 5 мин — во всех остальных случаях);

t_c — время сообщения о пожаре в пожарную охрану (1 мин — если телефон находится в помещении дежурного; 2 мин — если телефон в другом помещении);

$t_{сб} = 1$ мин — время сбора личного состава по тревоге;

$t_{сл}$ — время следования пожарного подразделения (2 мин на 1 км пути);

$t_{б,р}$ — время боевого развертывания (3 мин при подаче 1-го ствола; 5 мин в других случаях).

В общей сложности время от начала пожара до начала тушения составит от 10 до 22 мин.

Даже за 10 мин пожар, например по древесине, может развиваться до площади в 1000 м². Вот почему важно применение автоматических установок пожаротушения, к которым относятся РУП, способных приступить к пожаротушению сразу же после обнаружения возгорания и времени активации $t_{акт}$ технических средств. В этом случае время свободного развития пожара $t_{св}$ для помещений, оборудованных РУП, с учетом того, что $t_{обн} = t_{изв} + t_{ппк}$, определится по формуле:

$$t_{св} = t_{изв} + t_{ппк} + t_{акт}, \quad (9)$$

где $t_{изв}$ — инерционность извещателей системы пожарной сигнализации принимается по ГОСТ 26342–84 (действующий статус подтвержден в 2023 г.) из следующего ряда:

- для оптических дымовых извещателей: 1; 3; 5; 10; 20; 30 с;
 - для извещателей пламени: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 с;
 - для тепловых извещателей: 5; 10; 30; 60; 90; 120 с;
- $t_{ппк} = 10$ с — время срабатывания приемно-контрольного прибора.

Определим $t_{акт}$ РУП, которое включает в себя:

$$t_{акт} = t_m + t_{нав} + t_{ид}, \quad (10)$$

где t_m — время мониторинга высокотемпературных источников излучения:

$$t_m = \frac{Y_c}{V_m}; \quad (11)$$

Y_c — сектор поиска ПРС;

V_m — угловая скорость мониторинга;

$$t_{нав} = \frac{Y_{нав}}{V_{нав}}; \quad (12)$$

$t_{нав}$ — время наведения на обнаруженный очаг возгорания;

$Y_{нав}$ — сектор наведения ПРС;

$V_{нав}$ — угловая скорость наведения;

$t_{ид} \leq 15$ с — время идентификации возгорания по признакам пламени.

Для РУП время активации $t_{акт}$ от команды на инициализацию до начала тушения составляет: $t_{акт} \leq 40$ с.

Таким образом, время свободного развития пожара по формуле (9) составит:

- для РУП с дымовыми извещателями $t_{св} = 80$ с;
- для РУП с извещателями пламени $t_{св} = 55$ с.

Площадь пожара

Площадь пожара $S_{п}$ определяется с учетом его свободного развития за время $t_{св}$. При круговом развитии пожара в центре помещения площадь пожара будет равна площади круга ($k = 1$), в случае пристенного развития пожара площадь пожара будет равна площади полукруга ($k = 0,5$). В зависимости от линейной скорости распространения пожара $v_{л}$ для начальной стадии с коэффициентом 0,5 (Приложение В СП 485.1311500.2020⁴):

$$S_{п} = k \cdot \pi \cdot R^2 = k \cdot \pi \cdot (0,5 \cdot v_{л} \cdot t_{св})^2. \quad (13)$$

Определим расстояние R , пройденное фронтом пламени, за время $t_{св}$ для РУП.

Примем значение высокой линейной скорости распространения пламени, например, для хвойной древесины $V_{л.в} = 0,059$ м/с и средней скорости $V_{л.с} = 0,04$ м/с из таблицы В1 СП 485.1311500.2020⁴, тогда по формуле (13) получаем:

$R_v = 0,5 \cdot V_{л.в} \cdot t_{св} = 0,5 \cdot 0,059 \cdot 80 = 2,36$ м — для высокой скорости;

$R_c = 0,5 \cdot V_{л.с} \cdot t_{св} = 0,5 \cdot 0,04 \cdot 80 = 1,6$ м — для средней скорости.

Площадь свободного развития пожара будет составлять:

- при высокой линейной скорости пожара:

$$S_{п} = k \cdot \pi \cdot R_v^2 = 1 \cdot 3,14 \cdot 2,36^2 = 17,5 \text{ м}^2;$$

- при средней линейной скорости пожара:

$$S_{\Pi} = 1 \cdot 3,14 \cdot 1,6^2 = 8,0 \text{ м}^2.$$

Условие эффективности установки пожаротушения

Площадь свободного развития пожара S_{Π} не должна превышать площадь развития пожара $S_{\Pi,а}$ за время активации $t_{\text{акт}}$ установки пожаротушения, определяемое началом пожаротушения, в соответствии с условием эффективности, установленным в СП 485.1311500.2020², Приложение В1, п. В1.1:

$$S_{\Pi} < S_{\Pi,а}. \quad (14)$$

Соответственно, время свободного развития пожара $t_{\text{св}}$ должно быть меньше времени введения технических средств или времени активации $t_{\text{акт}}$:

$$t_{\text{акт}} < t_{\text{св}}. \quad (15)$$

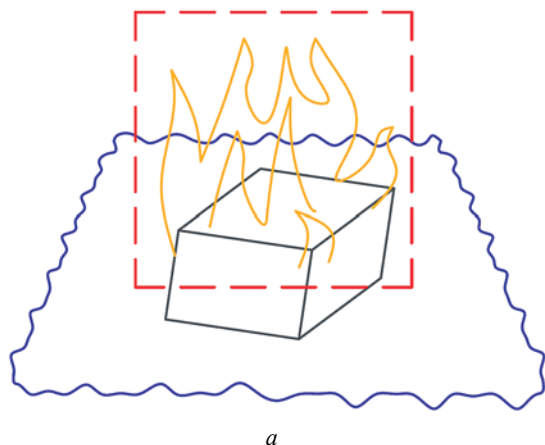
Площадь пожара, измеряемая РУП

Координаты очага возгорания и площади пожара определяются извещателями наведения ПРС, которые выдают данные о площади пожара S_{Π} (на рис. 1 показано красным пунктиром). Со стороны ПРС фиксируется все пламя S_{Π} , заключенное в прямоугольник со сторонами $L_{\Pi} \times H_{\Pi}$. Устройство управления РУП по данным с разных ПРС определяет непосредственно площадь горящей поверхности очага пожара $S_{\Pi,г}$:

$$S_{\Pi,г} = L_{\Pi,г} \cdot H_{\Pi,г}. \quad (16)$$

Эти данные сравниваются с допустимой площадью за время активации $S_{\Pi,а}$ с соблюдением условия:

$$S_{\Pi,г} < S_{\Pi,а}. \quad (17)$$



Минимальная площадь пожара

Минимальная площадь пожара $S_{\Pi,м}$, которая по техническим требованиям, в соответствии с утвержденной ВНИИПО МЧС РФ «Программой и методикой испытаний»⁹, должна быть для РУП не менее приведенной площади $S_{\Pi,м} = 18,7 \text{ м}^2$ модельного очага пожара класса А, ранга 4А по ГОСТ Р 51017–2009, Приложение Б¹⁰, с пожарной нагрузкой 2402 МДж (рис. 2). Площадь свободного развития пожара S_{Π} должна быть не более минимальной площади пожара $S_{\Pi,м}$:

$$S_{\Pi} < S_{\Pi,м}. \quad (18)$$

Площадь сдерживания пожара

В соответствии с требованиями Технического регламента, ст. 116, РУП должны обеспечивать обнаружение и ликвидацию или ограничение распространения пожара за пределы очага. Если площадь свободного развития пожара S_{Π} больше минимальной площади пожара $S_{\Pi,м}$:

$$S_{\Pi} > S_{\Pi,м}, \quad (19)$$

то РУП переводится в режим сдерживания пожара, при котором производится тушение по периметру очага пожара (технические решения по сдерживанию пожара АУП приведены в статье [16]).

Параметры тушения строчным сканированием

РУП производит пожаротушение сканированием строчными струями (рис. 3). Тушение сканирующими

⁹ Программа и методика испытаний АБМИ.00.000.ПМ. Огневые испытания. Определение параметров ликвидации пожара стационарными пожарными роботизированными стволами, входящими в состав роботизированных установок пожаротушения. М. : ВНИИПО, 2014.

¹⁰ ГОСТ Р 51017–2009. Техника пожарная. Огнетушители передвижные. Общие технические требования. Введ. 01.01.2010. М. : Стандартинформ, 2009.

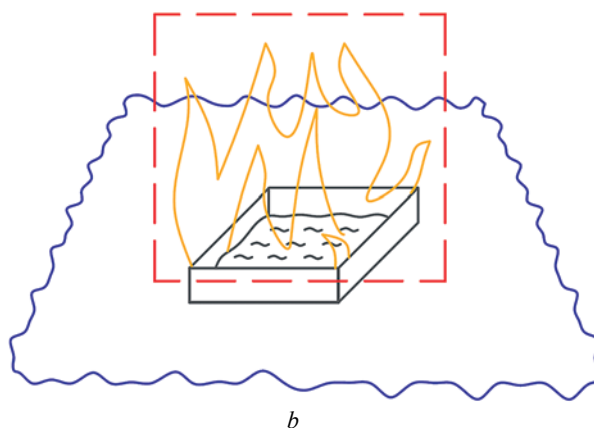


Рис. 1. Общий вид со стороны ПРС очага и зоны орошения: *a* — пожар класса А; *b* — пожар класса В

Fig. 1. General view of the source of ignition and the irrigation zone by the RFM: *a* — class A fire; *b* — class B fire



Рис. 2. Огневые испытания на модельном очаге по программе и методике испытаний АБМИ.112.00.000 ПМ

Fig. 2. Fire tests on a model hearth according to the program and test methodology ABMI.112.00.000 PM

струями рассмотрено в работе «Актуальные проблемы навигации на очаг пожара пожарных роботизированных стволов в роботизированных установках пожаротушения» [17].

Тушение производится в растре $S_T = L \cdot H$ (рис. 4), пошаговым перемещением строк, с величиной шага h , учитывающей размещение строки в зоне высокой интенсивности орошения струи.

Площадь тушения в растре сканирования S_T должна покрывать площадь горящей поверхности $S_{пг}$ и учитывать погрешность наведения dL и dH (рис. 5).

Погрешности наведения dL и dH определяются отклонением струи от площади горения очага $L_{п.г} \times H_{п.г}$ (рис. 5). Расчеты струи, направленной по баллистической траектории по координатам цели от извещателей наведения, выполняются по программе «Баллистика», концепция которой представлена в монографии [1]. С учетом погрешности наведения площадь тушения в растре S_T будет:

$$S_{T,p} = H \cdot L = (2dH + H_{п.г}) \cdot (2dL + L_{п.г}). \quad (20)$$

Линейные погрешности dL и dH близки друг к другу и определяются по формуле:

$$dL = dH = \frac{2\pi R_3}{360 \cdot d_{угл}}. \quad (21)$$

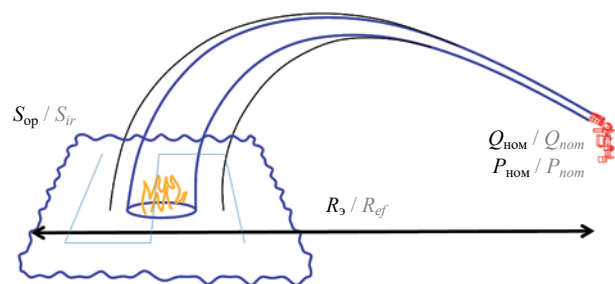


Рис. 3. Тушение строчным сканированием

Fig. 3. Extinguishing by line scanning

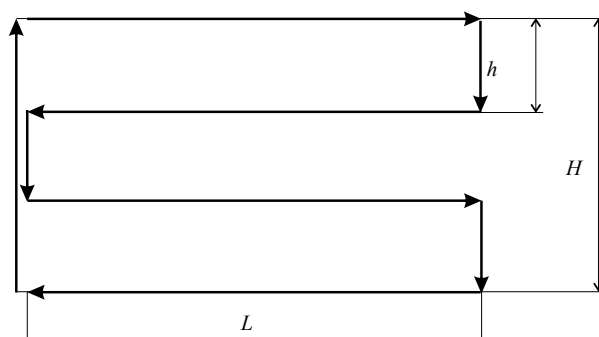


Рис. 4. Параметры раstra сканирования

Fig. 4. Scan raster parameters

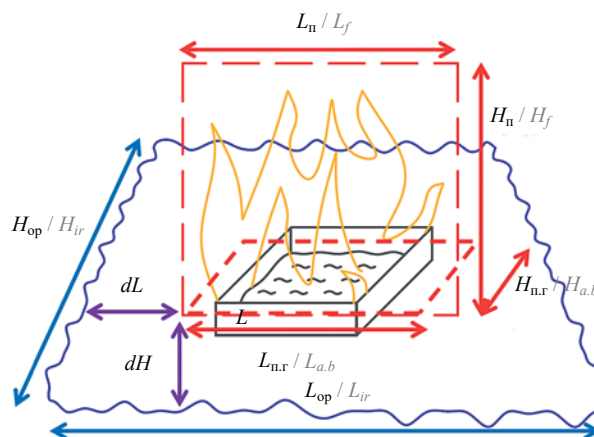


Рис. 5. Параметры площади пожара и площади тушения

Fig. 5. Parameters of fire area and extinguishing area

По ГОСТ Р 53326¹, угловая погрешность позиционирования $d_{угл} = 2^\circ$, при этом учитывается, что на границе зоны орошения перемещение при реверсе останавливается и струя рассматривается как стационарная. R_3 — эффективная дальность при данном угле наведения.

Определим площадь тушения очага возгорания при свободном развитии пожара на высокой линейной скорости горения, при $S_{п} = 17,5 \text{ м}^2$, для 3-й группы помещений по пожароопасности с параметрами:

$$i_{п} = 0,24 \text{ л/с}; V_{п} = 0,059 \text{ м/с}; R_3 = 50 \text{ м}.$$

Согласно табл. 6.1 СП 485.1311500.2020⁴, для 3-й группы помещений общий расход водяной АУП должен составлять не менее 60 л/с, но с учетом опытных данных принимаем расход для РУП $Q = 40 \text{ л/с}$.

Примем для упрощения площадь $S_{п} = 17,5 \text{ м}^2$ со сторонами $H_{п.г} = L_{п.г} = 4,2 \text{ м}$, тогда:

$$dH = dL = \frac{2\pi R_3}{360 \cdot d_{угл}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{360 \cdot 2} = 1,7 \text{ м}.$$

Площадь тушения на дальности 50 м будет составлять:

$$S_T = (2dL + L_{п.г})^2 = (2 \cdot 1,7 + 4,2)^2 = 57,8 \text{ м}^2.$$

Интенсивность орошения на площади тушения, принимая во внимание коэффициент потерь $K = 0,5$, будет составлять:

$$i_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ном}} \cdot K}{S_{\text{т}}} = \frac{40 \cdot 0,5}{57,8} = 0,35 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Эффективная дальность

Площадь падения эффективной части струи РУП на поверхность определяется по эяуром орошения (рис. 6). Сечение струи в плоскости падения имеет форму неправильного эллипса с расширенным фронтом впереди и вытянутой хвостовой частью. Интенсивность орошения неравномерная. В головной части эллипса наиболее высокая интенсивность орошения.

Эффективная дальность струи $R_{\text{э}}$ (рис. 6) определяется расстоянием до точки дальней границы эффективной зоны орошения, нижняя граница которой определяется глубиной тушения или шагом сканирования h . При сканировании струей в полосе на глубину этой зоны (h) средняя интенсивность орошения $i_{\text{ср}}$ должна быть не меньше нормируемой $i_{\text{н}}$ на площади, не менее минимальной площади тушения $S_{\text{т.м}}$. При этом на максимально удаленной границе пятна орошения зоны эффективной интенсивности (на эяуре — красным) показана эффективная дальность. Эффективная дальность определяет схему расстановки ПРС на объекте защиты с условием обеспечения орошения каждой точки защищаемого помещения не менее чем двумя ПРС.

Минимальная площадь тушения

Минимальная площадь тушения $S_{\text{т.м}}$ определяется минимальной площадью пожара $S_{\text{п.м}} = H_{\text{п.м}} \cdot L_{\text{п.м}}$ с учетом погрешностей наведения dL и dH , см. рис. 5, на эффективной дальности $R_{\text{э.м}}$, при которой на площади тушения $S_{\text{п.м}}$ соблюдается условие $i_{\text{ср}} \geq i_{\text{н}}$:

$$S_{\text{т.м}} = H \cdot L = (2dH + H_{\text{п.м}}) \cdot (2dL + L_{\text{п.м}}). \quad (22)$$

Примем для упрощения расчетов $H_{\text{п.м}} = L_{\text{п.м}}$ и $dH = dL$, тогда $H = L$.

Для площади пожара $S_{\text{п.м}} = 18,7 \text{ м}^2$ (согласно [7]): $H_{\text{п.м}} = L_{\text{п.м}} = 4,3 \text{ м}$.

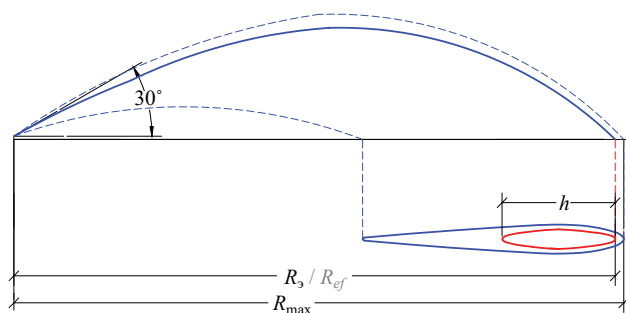


Рис. 6. Эяюра орошения ПРС

Fig. 6. Diagram of irrigation by RFM

Рассмотрим удаленный участок для 3-й группы помещений по СП 485.1311500.2020⁴ с параметрами:

$$i_{\text{н}} = 0,24 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}, V_{\text{л}} = 0,059 \text{ м/с}, R_{\text{эм}} = 55 \text{ м}.$$

Расход при этом примем не 60 л/с, а 40 л/с: $Q = 40 \text{ л/с}$.

$$dL = \left(\frac{2\pi R_{\text{эм}}}{360} \right) \cdot d_{\text{угл}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 55}{360 \cdot 2} = 1,9 \text{ м}.$$

Расчетная площадь орошения будет:

$$S_{\text{т.м}} = (2dL + L)^2 = (2 \cdot 1,9 + 4,3)^2 = 65,6 \text{ м}^2.$$

Определим интенсивность орошения $i_{\text{ср}}$ на площади $S_{\text{т.м}}$ по формуле (2), принимая во внимание коэффициент потерь $K = 0,5$:

$$i_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ном}} \cdot K}{S_{\text{т}}} = \frac{40 \cdot 0,5}{65,6} = 0,31 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2\text{)},$$

при $i_{\text{н}} = 0,24 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}.$

Для стволов с расходом 40 л/с по расчетным данным на минимальной площади тушения $S_{\text{т.м}} = 65,6 \text{ м}^2$ условие $i_{\text{ср}} > i_{\text{н}}$ соблюдено. Таким образом, при нормативном значении общего расхода 60 л/с значение нормативной интенсивности орошения на площади тушения может быть обеспечено и при применении ПРС с расходом 40 л/с.

Эффективная дальность $R_{\text{э}}$ на удаленной площади $S_{\text{т.м}}$ при условии $i_{\text{ср}} \geq i_{\text{н}}$ подтверждается испытаниями. По эффективной дальности $R_{\text{э.м}}$ определяются размеры защищаемой зоны при проектировании, и этот показатель включается в технические характеристики ПРС.

Выводы

За более чем 30-летний опыт применения роботизированных установок пожаротушения как самостоятельного вида АУП эти установки так и не имеют достаточной нормативной базы по параметрам применения. РУП со своими multifunctional возможностями позволяют существенно улучшить параметры пожаротушения по уменьшению расхода и времени пожаротушения. Это достигается за счет тушения всем расходом очага возгорания в начальной стадии с высокой интенсивностью орошения и повышения быстродействия РУП. Применение новых параметров РУП позволяет значительно повысить эффективность по таким показателям, как уменьшение расхода, сокращение времени тушения и уменьшение ущерба от пожара. Однако следует сделать оговорку в пользу прогрессивных решений. Повышение эффективности пожаротушения

РУП напрямую зависит от технических средств, составляющих данную установку. Качество струи (возможность подачи наибольшего объема ОТВ на наибольшее расстояние), погрешности обнаружения координат и площади очага пожара, погреш-

ности наведения струи ОТВ на очаг, возможности алгоритмизации РУП под изменения обстановки на пожаре — это составляющие повышения эффективности пожаротушения РУП в сравнении с установленными на данный момент параметрами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горбань Ю.И. Пожарные роботы и ствольная техника в пожарной автоматике и пожарной охране. М. : Пожнаука, 2013. 352 с.
2. Мешман Л.М., Верещагин С.Н. Современная пожарная робототехника: Обзорная информация. М. : ГИЦ МВД СССР, 1988. 42 с.
3. Мешман Л.М., Пивоваров В.В., Гомозов А.В., Верещагин С.Н. Пожарная робототехника: Состояние и перспективы использования. Обзорная информация. М. : ВНИИПО МВД СССР, 1992. 82 с.
4. Корсунский В. Разработка противопожарных роботов в России // Мир и безопасность. 2007. № 3. С. 42–46.
5. Горбань Ю.И., Цариченко С.Г. Роботизированные установки пожаротушения — современные технологии пожаротушения с российским приоритетом // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Vol. 31. Issue 5. С. 54–66. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.54-66
6. Shanee Honig, Tal Oron-Gilad. Understanding and resolving failures in human-robot interaction: Literature review and model development // Frontiers in Psychology. 2018. Vol. 9. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00861
7. Liu P., Yu H., Cang S., Vladareanu L. Robot-assisted smart firefighting and interdisciplinary perspectives // 2016 22nd International Conference on Automation and Computing (ICAC). Colchester, University of Essex, UK, 7–8 September 2016. DOI: 10.1109/ICAC.2016.7604952
8. Tan Chee Fai, Liew S.M., Alkahari M.R., Ranjit S.S.S., Said M.R., Chen W. et al. Fire fighting mobile robot: state of the art and recent development // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2013. Vol. 7. Issue 10. Pp. 220–230.
9. Горбань Ю.И., Немчинов С.Г. Пожарные роботы в пожарной автоматике: научно-технические исследования, алгоритмы поведения и дизайн // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. № 5. С. 82–88. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/925/611>
10. Weselow A.I., Meschman L.M. Automatischer Brand- und Explosionschutz. Berlin : Staatsverlag DDR, 1979. 200 s.
11. Patent EU, No. 2599525, IPC A62C 31/00 (2006.01), A62C 35/68 (2006.01). An automated fire-fighting complex integrating a television system. Gorban Yu.I. No. 11815812.0, appl. July 14, 2011; publ. December 30, 2015. Bull. 2015/53.
12. Gorban Yu.I. Fire robots // Industrial Fire Journal. 2016. Vol. 103. Pp. 12–13.
13. Jensen G. Fire fighting systems: Comparison of performances of interior and exterior applications at large wood buildings. KAPROJECT. Test report A075349. Final. Trondheim : COWI AS, 2018. 26 p.
14. Jensen G. Performance test series on exterior and interior water based fire suppression systems — Technical specification. COWI on behalf of KA. 2016.
15. Горбань Ю.И. От спринклеров к пожарным мини-роботам // Пожарная автоматика. Средства спасения : межотраслевой специализированный журнал. 2018. С. 44–45.
16. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бондар А.И., Балабанов И.Д. Особенности реализации автоматических установок сдерживания пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 43–53. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.43-53
17. Мешман Л.М., Былинкин В.А., Горбань Ю.И., Горбань М.Ю., Фокичева К.Ю. Актуальные проблемы навигации на очаг пожара пожарных роботизированных стволов в роботизированных установках пожаротушения. Часть 1. Предпосылки создания РУП и специфические особенности тушения пожаров ПРС // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 3. С. 70–88. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.70-88

REFERENCES

1. Gorban Yu.I. *Firefighting robots, fire monitors and handline nozzles in fire automatics and fire protection*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2013; 352. (rus).
2. Meshman L.M., Vereshchagin S.N. *Modern fire robotics: Overview*. Moscow, Main Information Center of the Ministry of Internal Affairs USSR Publ., 1988; 42. (rus).
3. Meshman L.M., Pivovarov V.V., Gomozev A.V., Vereshchagin S.N. *Fire robotics. State and prospects of use: Overview*. Moscow, VNIIPPO Publ., 1992; 82. (rus).

4. Korsunskiy V. Development of firefighting robots in Russia. *Mir i bezopasnost/Peace and security*, 2007; 3:42-46. (rus).
5. Gorban Yu.I., Tsarichenko S.G., Robotic fire suppression systems — modern firefighting technologies with Russian priority. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):54-66. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.54-66 (rus).
6. Honig S., Oron-Gilad T. Understanding and resolving failures in human-robot interaction: Literature review and model development. *Frontiers in Psychology*. 2018; 9. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00861
7. Liu P., Yu H., Cang S., Vladareanu L. *Robot-assisted smart firefighting and interdisciplinary perspectives*. 2016 22nd International Conference on Automation and Computing (ICAC). Colchester, University of Essex, UK, September 7–8, 2016. DOI: 10.1109/ICAC.2016.7604952
8. Tan Chee Fai, Liew S.M., Alkahari M.R., Ranjit S.S.S., Said M.R., Chen W. et al. Fire fighting mobile robot: state of the art and recent development. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2013; 7(10):220-230.
9. Gorban Yu.I., Nemchinov S.G. Fire-fighting robots are in the fire automation: science and technology studies, the behavior of algorithms and design. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 5:82-88. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/925/611> (rus).
10. Weselow A.I., Meschman L.M. *Automatischer Brand- und Explosionschutz*. Berlin, Staatsverlag DDR, 1979; 200.
11. Patent EU, No. 2599525, IPC A62C 31/00 (2006.01), A62C 35/68 (2006.01). *An automated fire-fighting complex integrating a television system*. Gorban Yu.I. No. 11815812.0, appl.: July 14, 2011; publ. December 30, 2015. Bull. 2015/53.
12. Gorban Yu.I. Fire robots. *Industrial Fire Journal*. 2016; 103:12-13.
13. Jensen G. *Fire fighting systems: Comparison of performances of interior and exterior applications at large wood buildings. KAPROJECT. Test report A075349. Final*. Trondheim, COWI AS, 2018; 26.
14. Jensen G. *Performance test series on exterior and interior water based fire suppression systems — Technical specification*. COWI on behalf of KA, 2016.
15. Gorban Yu.I. From sprinklers to firefighting mini robots. *Pozharnaya avtomatika. Sredstva spaseniya/Fire automatics. Means of Rescue: An Interdisciplinary Specialized Journal*, 2018; 44-45. (rus).
16. Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A., Bondar A.I., Balabanov I.D. Aspects of implementation of automatic fire containment systems. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):43-53. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.43-53 (rus).
17. Meshman L.M., Bylinkin V.A., Gorban Yu.I., Gorban M.Yu., Fokicheva K.Yu. Topical issues of direction of robotic fire monitors to the fire source in robotic fire suppression systems. Part 1. Prerequisites for the creation of RFSS and specific features of extinguishing fires by FRM. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(3):70-88. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.70-88 (rus).

Поступила 05.06.2023, после доработки 19.06.2023;

принята к публикации 27.06.2023

Received June 5, 2023; Received in revised form June 19, 2023;

Accepted June 27, 2023

Информация об авторах

ГОРБАНЬ Юрий Иванович, академик НАНПБ, председатель совета директоров, главный специалист по пожарной робототехнике, ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР», Республика Карелия, 185031, г. Петрозаводск, ул. Заводская (Северная промзона р-он), 4; ORCID: 0000-0002-4452-6798; e-mail: info@efer.pro

НЕМЧИНОВ Сергей Георгиевич, генеральный директор, ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР», Республика Карелия, 185031, г. Петрозаводск, ул. Заводская (Северная промзона р-он), 4; ORCID: 0000-0002-8669-1724; e-mail: info@efer.pro

ЦАРИЧЕНКО Сергей Георгиевич, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8669-1724; e-mail: info@efer.pro

Information about the authors

Yuriy I. GORBAN, Academician of the National Academy of Fire Safety Sciences, Chairman of the Board of Directors, Chief Specialist in Fire Robotics, “Engineering Centre of Fire Robots Technology “FR” LLC, Zavodskaya St., 4, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185031, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4452-6798; e-mail: info@efer.pro

Sergey G. NEMCHINOV, General Director, “Engineering Centre of Fire Robots Technology “FR” LLC, Zavodskaya St., 4, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185031, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8669-1724; e-mail: info@efer.pro

Sergey G. TSARICHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8669-1724; e-mail: info@efer.pro

лавское шоссе, 26; РИНЦ ID: 181475; Scopus AuthorID: 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

ТУРОВСКИЙ Аристарх Альбертович, главный специалист по НИОКР, ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР», Республика Карелия, 185031, г. Петрозаводск, ул. Заводская (Северная промзона р-он), 4; ORCID: 0009-0005-9336-6654; e-mail: aa.turovskiy@efer.pro

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ration; ID RISC: 181475; Scopus AuthorID: 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

Aristarkh A. TUROVSKIY, Chief R&D Specialist, “Engineering Centre of Fire Robots Technology “FR” LLC, Zavodskaya St., 4, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185031, Russian Federation; ORCID: 0009-0005-9336-6654; e-mail: aa.turovskiy@efer.pro

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Оптимизация управленческих решений при проведении поисково-спасательных операций

Наталья Владимировна Каменецкая ✉, Анатолий Павлович Корольков,
Сергей Аркадьевич Нефедьев, Юрий Дмитриевич Моторыгин

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Эффективное применение сил и средств МЧС России для решения широкого спектра задач по предназначению в значительной степени зависит от деятельности системы управления ведомства, связанной с разработкой оптимальных решений и планов. Руководитель соответствующего уровня управления МЧС России при выработке решения сталкивается с необходимостью разработки оптимальных в ожидаемых условиях обстановки способов действий подчиненных сил и средств. Использование методов теории принятия решений и исследования операций в таких условиях является наиболее прагматичным подходом.

Цели и задачи. Нахождение оптимального плана обнаружения потерпевшего катастрофу объекта в зоне ЧС в кратчайшие сроки и с минимальным количеством жертв — задача оптимизационная, которую следует решать с помощью известных математических методов (методов исследования операций). Эта задача может быть сформулирована так: определить оптимальную последовательность обхода участков района поиска объекта в зоне катастрофы в кратчайшие сроки.

Методы. Для решения поставленной задачи использованы два метода: метод динамического программирования (ДП) и приближенный метод, полученный экспериментально. С помощью составленного функционального уравнения Р. Беллмана построена математическая модель для прогнозирования различных вариантов развития событий и нахождения оптимального варианта решения задачи.

Результаты и их обсуждение. В статье рассмотрены методы оптимизации решений при проведении поисково-спасательных операций в зоне чрезвычайной ситуации с целью поддержки принятия управленческих решений в оперативной деятельности МЧС России. С использованием метода ДП предложен способ нахождения оптимального плана обследования участков района поиска объекта. Приведены расчеты с конкретными исходными данными для составления оптимального маршрута поиска объекта в кратчайшие сроки. Предложен приближенный способ отыскания оптимальной последовательности обхода участков поиска объекта при незначительном упрощении исходных данных, что доказано экспериментально на различных примерах и с различными исходными данными.

Выводы. Математическое моделирование успешно применяется в задачах оптимизации процессов управления силами и средствами МЧС России. Методы исследования операций используются также при решении задач оперативной деятельности министерства, которые используют ДП для пошагового нахождения оптимального варианта управленческого решения.

Ключевые слова: катастрофы; подразделение спасателей; исследование операций; метод динамического программирования; оптимизация поиска

Для цитирования: Каменецкая Н.В., Корольков А.П., Нефедьев С.А., Моторыгин Ю.Д. Оптимизация управленческих решений при проведении поисково-спасательных операций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 68–76. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.68-76

✉ Каменецкая Наталья Владимировна, e-mail: natkam53@mail.ru.

Optimization of management decisions during search and rescue operations

Nataliya V. Kamenetskaya ✉, Anatoliy P. Korolkov, Sergey A. Nefedev, Yuriy D. Motorygin

Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Effective application of forces and means of the Ministry of Emergency Situations of Russia for solving a wide range of tasks according to the intended purpose to a great extent depends on the activity of

the management system of the department connected with the development of optimal decisions and plans. The head of the appropriate level of management of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation when making a decision faces the need to develop optimal ways of action of subordinate forces and means in the expected conditions of the situation. The use of methods of decision-making theory and operations research in such conditions is the most pragmatic approach.

Aims and purposes. Finding the optimal plan for detecting the victim of a catastrophe object in the emergency zone in the shortest possible time and with a minimum number of casualties is an optimization problem, which should be solved using known mathematical methods (methods of operations research). This problem can be formulated as follows: to determine the optimal sequence of traversal of the search area of the object in the disaster zone in the shortest possible time.

Methods. Two methods were used to solve the problem: the method of dynamic programming (DP) and an approximate method obtained experimentally. Using the R. Bellman functional equation, a mathematical model for predicting different variants of event development and finding the optimal variant of the problem solution was constructed.

Results and discussions. The article considers the methods of optimization of decisions during search and rescue operations in the emergency zone in order to support managerial decision-making in the operational activity of the Ministry of Emergency Situations of Russia. The method of finding the optimal plan of surveying the areas of the search area of the object is proposed using the method of DP. Calculations with specific initial data for drawing up the optimal route of object search in the shortest possible time are given. The approximate method of finding the optimal sequence of detour of object search areas with a slight simplification of initial data is proposed, which is proved experimentally on different examples and with different initial data.

Conclusions. Mathematical modelling is successfully applied in tasks of optimization of processes of management of forces and means of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Methods of operations research are also used in solving the problems of operational activity of the Ministry, which use DP for step-by-step finding the optimal variant of management decision.

Keywords: disaster; rescue units; operations research; method of dynamic programming; search optimization

For citation: Kamenetskaya N.V., Korolkov A.P., Nefedev S.A., Motorygin Yu.D. Optimization of management decisions during search and rescue operations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4):68-76. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.68-76 (rus).

✉ Nataliya Vladimirovna Kamenetskaya, e-mail: natkam53@mail.ru.

Введение

Одной из актуальных проблем, возникающих в ходе предупреждения и ликвидации ЧС на объектах водного транспорта, является разрешение противоречия между объемом обрабатываемой информации, используемой информационной технологией и сложностью реализации процедуры принятия решений должностными лицами ЦУКС. Несмотря на то что в данном направлении проведено большое количество исследований, существующие противоречия в достаточной степени не разрешены. Выходом из существующего положения является автоматизация процедуры поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации ЧС на основе современных информационных технологий.

Неотъемлемой частью поисково-спасательных операций является комплекс организационных и технических мероприятий, обеспечивающих обнаружение и установление координат местоположения людей, которые терпят бедствие на море или на суше, и их последующее спасение.

Именно от эффективности функционирования системы управления зависит успешное проведение поисково-спасательной операции с применением сил и средств МЧС России.

Руководитель соответствующего уровня управления МЧС России при выработке решения сталкивается с необходимостью разработки оптимальных

в ожидаемых условиях обстановки способов действий подчиненных сил и средств. Использование методов теории принятия решений и исследования операций в этих условиях является наиболее прагматичным подходом [1–4].

Цели и задачи исследования

С начала века возросли масштабность, частота и тяжесть катастроф как на суше, так и на море с увеличением числа пострадавших. Для своевременного оказания экстренной помощи терпящим бедствие в зоне ЧС, тем более если инцидент произошел в экстремальных условиях Арктики, требуется вовлечение значительных сил и средств спасения в предельно короткие сроки. Своевременное и квалифицированное оказание всесторонней помощи пострадавшим является необходимым условием сохранения жизни людей в зоне бедствия.

Результаты анализа статистических данных произошедших катастроф свидетельствуют, что фактор времени для спасения людей в зоне бедствия играет решающую роль. Обнаружение затонувшего судна или потерпевшего крушение лайнера в зоне катастрофы является одной из наисложнейших задач [5].

Таким образом, проблема поиска, спасения и оказания помощи пострадавшим в катастрофах в районах бедствия является актуальной. Необходима оптимизация использования всех средств поиска

и спасения (авиационных, морских, космических, радионавигационных) для минимизации времени поиска, количества погибших и пострадавших в зоне бедствия как на море, так и на суше.

Постановка задачи

В качестве частной задачи оптимизации процесса принятия управленческого решения рассмотрим задачу о разработке оптимального плана обследования участков района поиска с целью обнаружения объекта, терпящего бедствие в труднодоступном районе, в кратчайшие сроки.

Нахождение оптимального плана обнаружения потерпевшего катастрофу объекта в зоне ЧС в кратчайшие сроки и с минимальным количеством жертв — задача оптимизационная, которую следует решать с помощью известных математических методов (методов исследования операций).

Решение данной задачи может быть осуществлено с помощью метода динамического программирования [1–4]. Наряду с этим возможно использование и приближенного способа отыскания оптимальной очередности обследования участков района поиска объекта, полученного экспериментально и дающего тот же самый результат.

Применение математического моделирования для прогнозирования различных вариантов развития событий в сложных условиях ликвидации последствий ЧС позволяет обеспечить высокую эффективность формирования оптимальных управленческих решений, что подтверждается многолетним зарубежным опытом [6–12]. Для решения ряда задач оперативной деятельности подразделений МЧС России используются методы теории принятия решений и исследования операций [13–18].

Методы исследования

Для определения оптимальной последовательности обхода участков района поиска объекта в зоне бедствия в кратчайшие сроки применим метод ДП. Построим математическую модель для нахождения оптимального плана решения поставленной задачи.

Предположим, район, в котором с большой вероятностью находится объект поиска, например затонувшее судно или потерпевший крушение авиалайнер, состоит из пяти участков ($N = 5$). Отряд спасателей, который занимается поиском объекта в зоне катастрофы, должен выполнить задачу в кратчайшие сроки. Исходными данными для отыскания оптимальной последовательности обхода участков, где возможно находится объект поиска, являются:

p_i — вероятности нахождения объекта на i -м участке;

T_{0i} — время перехода спасателя из исходного пункта к i -му участку;

T_{ij} — время перехода спасателя из i -го участка в j -й;

T_i — среднее время обхода i -го участка.

Участок считается обследованным в двух случаях: либо объект обнаружен на этом участке, либо установлен факт его отсутствия на нем.

Поставленную задачу можно решить методом ДП, который подразумевает пошаговый поиск оптимального плана [2–4]. Функциональное уравнение Р. Беллмана для данной задачи имеет вид [1, 3]:

$$f_n^{(b_n)}(a_1, \dots, a_n) = \min_{1 \leq k \leq n} \left\{ T_{a_k} + \left(1 - \frac{p_{a_k}}{\sum_{i=1}^n p_{a_i}} \right) \times \right. \\ \left. \times \left[f_{n-1}^{(b_{n-1})}(a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_{k+1}, \dots, a_n) + T_{a_k b_{n-1}} \right] \right\},$$

где a_k — номер участка, который обследуется первым в последовательности $(a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n)$; T_{a_k} — среднее время, которое потребуется для обследования участка a_k ;

$1 - \frac{p_{a_k}}{\sum_{i=1}^n p_{a_i}}$ — вероятность того, что на участке a_k объекта не оказалось, значит, объект находится на одном из $(n-1)$ участков $a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_{k+1}, \dots, a_n$;

$f_{n-1}^{(b_{n-1})}(a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_{k+1}, \dots, a_n)$ — минимальное время обхода $(n-1)$ участков в оптимальной последовательности, полученное на предыдущем этапе процесса ДП;

$T_{a_k, b_{n-1}}$ — время, которое потребуется для перехода от участка a_k к участку b_{n-1} , который в оптимальной последовательности обхода последних $(n-1)$ участков должен обследоваться первым;

$f_n^{(b_n)}(a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n)$ — время обхода n участков в оптимальной очередности, обеспечивающей завершение их обследования за минимальное время (оптимальное время на n -м этапе);

b_n — номер участка, который в оптимальной очередности должен быть обследован первым. Поскольку этот номер до составления плана неизвестен, то необходимо перебрать все n вариантов выбора одного из участков в качестве первого.

При этом b_n равно тому значению a_k , при котором достигается минимум.

Некоторые особенности существуют при $n = 1$ и при $n = N$.

При $n = 1$ имеется всего один вариант:

$$f_1^{(a_1)}(a_1) = T_{a_1}.$$

В случае $n = N$ нужно еще учесть время прихода на участок, обследуемый первым.

Метод ДП позволяет ограничиться только n вариантами, отличающимися номером участка, обследуемого первым в последовательности $a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n$.

В динамическом программировании процесс нахождения оптимального плана разбивается на этапы, число которых в данной задаче равно числу участков N .

В процессе пошагового поиска оптимального плана для данной задачи сначала находится оптимальное решение для различных комбинаций, состоящих из двух участков. Согласно принципу оптимальности Беллмана, на следующем этапе ДП находится оптимальное решение для различных комбинаций, состоящих из трех участков с учетом оптимальных решений, полученных на предыдущем этапе. И так продолжается до последнего этапа. Таким образом, формируется «оптимальное управление» в терминах метода ДП, которое и является искомым решением: оптимальной последовательностью обхода участков в зоне катастрофы с целью поиска пропавшего объекта за минимальное время.

Пример нахождения оптимальной последовательности обхода участков района поиска объекта в зоне ЧС в кратчайшее время методом ДП

Исходные данные для примера приведены в табл. 1 и 2.

Если на i -м участке обнаружен объект или установлен факт его отсутствия на нем, то этот участок считается обследованным. Время обследования двух последних, трех последних, четырех последних и всех участков приведено в табл. 3–6, в которых оптимальные последовательности обхода участков, полученные с помощью функционального уравнения Р. Беллмана и соответствующие минимальному времени $f_n^{(b_n)}$, выделены жирным шрифтом.

Продemonстрируем применение функционального уравнения Р. Беллмана при заполнении табл. 3–6. Покажем, как заполняется одна из строк в табл. 5. Для набора участков 1, 3, 4 и 5 первым может обследоваться любой из этих четырех участков. Пусть первым обследуется четвертый участок, на что требуется 10 ед. времени. Вероятность того, что на четвертом участке нет объекта поиска, равна:

$$1 - \frac{p_4}{p_1 + p_3 + p_4 + p_5} = 1 - \frac{0,2}{0,6} = 0,67.$$

Эта вероятность получилась из условия, что остальные участки, не входящие в данный набор (второй участок), уже обследованы, и объекта на них не оказалось.

С вероятностью 0,67 нет объекта и на четвертом участке, и тогда нужно обследовать другие

Таблица 1. Исходные данные по p_i , T_{0i} и T_i
Table 1. Initial data for p_i , T_{0i} and T_i

Номер участка i Number of section i	1	2	3	4	5
p_i	0,1	0,4	0,2	0,2	0,1
T_{0i}	2	2,5	2,8	2,5	3
T_i	7	5	4	10	2

Таблица 2. Исходные данные по времени перехода спасателя из i -го участка в j -й
Table 2. Initial data on the time of the rescuer's transition from the i -th section to the j -th

j -й участок j -th section	i -й участок i -th section				
	1	2	3	4	5
1	–	0,5	1	0,5	0,8
2	0,5	–	0,3	1,2	0,8
3	1	0,3	–	1,5	0,6
4	0,5	1,2	1,5	–	0,5
5	0,8	0,8	0,6	0,5	–

Таблица 3. Оптимальные решения для двух участков
Table 3. Optimal solutions for two sections

Участки (a_1, a_2) Sections (a_1, a_2)	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,2}$	Участки (a_1, a_2) Sections (a_1, a_2)	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,2}$
1 и 2 1 and 2	1, 2 2, 1	11,4 6,5	2 и 4 2 and 4	2, 4 4, 2	8,73 14,13
1 и 3 1 and 3	1, 3 3, 1	10,33 6,67	2 и 5 2 and 5	2, 5 5, 2	5,56 6,64
1 и 4 1 and 4	1, 4 4, 1	14,0 13,5	3 и 4 3 and 4	3, 4 4, 3	9,75 12,75
1 и 5 1 and 5	1, 5 5, 1	8,4 5,9	3 и 5 3 and 5	3, 5 5, 3	4,87 5,07
2 и 3 2 and 3	2, 3 3, 2	6,43 7,53	4 и 5 4 and 5	4, 5 5, 4	10,83 9,0

три участка, 1, 3 и 5. Оптимальная последовательность обхода участков 1, 3 и 5 приведена в табл. 4. Это последовательность **3, (5, 1)**, а минимальное время обхода равно $f_4^{(3)}(1, 3, 5) = 7,25$. При этом будет затрачено на переход с четвертого участка на третий $T_{4,3} = 1,5$ ед. времени. Таким образом, для обхода участков 1, 3,

Таблица 4. Оптимальные решения для трех участков
Table 4. Optimal solutions for three sections

Участки (a_1, a_2, a_3) Sections (a_1, a_2, a_3)	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,3}$	Участки (a_1, a_2, a_3) Sections (a_1, a_2, a_3)	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,3}$
1, 2 и 3 1, 2 and 3	1, (2, 3) 2, (3, 1) 3, (2, 1)	12,94 7,99 8,86	1, 4 и 5 1, 4 and 5	1, (5, 4) 4, (5, 1) 5, (4, 1)	14,35 13,2 12,5
1, 2 и 4 1, 2 and 4	1, (2, 4) 2, (4, 1) 4, (2, 1)	14,91 11,3 15,5	2, 3 и 4 2, 3 and 4	2, (3, 4) 3, (2, 4) 4, (2, 3)	10,02 10,76 15,72
1, 2 и 5 1, 2 and 5	1, (2, 5) 2, (5, 1) 5, (2, 1)	12,05 7,23 8,83	2, 3 и 5 2, 3 and 5	2, (3, 5) 3, (2, 5) 5, (2, 3)	7,22 8,19 8,20
1, 3 и 4 1, 3 and 4	1, (3, 4) 3, (4, 1) 4, (3, 1)	15,6 13,0 14,9	2, 4 и 5 2, 4 and 5	2, (5, 4) 4, (2, 5) 5, (2, 4)	9,20 14,83 10,17
1, 3 и 5 1, 3 and 5	1, (3, 5) 3, (5, 1) 5, (3, 1)	11,4 7,25 7,45	3, 4 и 5 3, 4 and 5	3, (5, 4) 4, (3, 5) 5, (3, 4)	9,76 13,82 10,28

Таблица 5. Оптимальные решения для четырех участков
Table 5. Optimal solutions for four sections

Участки (a_1, a_2, a_3, a_4) Sections (a_1, a_2, a_3, a_4)	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,4}$	Участки (a_1, a_2, a_3, a_4) Sections (a_1, a_2, a_3, a_4)	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,4}$
1, 2, 3 и 4 1, 2, 3 and 4	1, (2, 3, 4) 2, (3, 4, 1) 3, (2, 4, 1) 4, (2, 3, 1)	16,35 12,39 12,81 17,15	1, 2, 4 и 5 1, 2, 4 and 5	4, (2, 5, 1) 5, (4, 1, 2)	16,32 12,59
1, 2, 3 и 5 1, 2, 3 and 5	1, (2, 3, 5) 2, (3, 5, 1) 3, (2, 5, 1) 5, (2, 3, 1)	13,76 8,78 9,65 9,69	1, 3, 4 и 5 1, 3, 4 and 5	1, (3, 5, 4) 3, (5, 4, 1) 4, (3, 5, 1) 5, (3, 4, 1)	15,97 12,73 15,86 13,33
1, 2, 4 и 5 1, 2, 4 and 5	1, (2, 5, 4) 2, (5, 4, 1)	15,49 11,65	2, 3, 4 и 5 2, 3, 4 and 5	2, (3, 5, 4) 3, (2, 5, 4) 4, (2, 3, 5) 5, (2, 3, 4)	10,59 11,39 16,55 11,62

Таблица 6. Оптимальные решения для пяти участков
Table 6. Optimal solutions for five sections

Участки (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) Sections (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,5} + T_{0,a_k}$
1, 2, 3, 4 и 5 1, 2, 3, 4 and 5	1, (2, 3, 5, 4) 2, (3, 5, 4, 1) 3, (2, 5, 4, 1) 4, (2, 3, 5, 1) 5, (2, 3, 4, 1)	18,98 15,32 16,36 20,48 16,87

4 и 5, если начать с четвертого, а остальные обойти в оптимальной последовательности, потребуется затратить $10 + 0,67(7,25 + 1,5) = 15,86$ ед. времени.

На последнем этапе процесса динамического программирования получается так называемое «оптимальное управление» в терминах метода ДП на основе пошагового применения функционального уравнения Р. Беллмана. Таким образом, оптимальная последовательность обхода для всех пяти участков **(2, 3, 5, 4, 1)** обеспечивает обнаружение объекта в кратчайшее время **15,32** ед. времени.

Пример определения оптимальной последовательности обхода участков района поиска объекта приближенным способом в кратчайшее время

Рассмотрим приближенный способ отыскания последовательности обхода участков района поиска объекта, который является более простым и не требует долгих вычислений.

Экспериментально, на различных примерах и с разными исходными данными, можно показать, что если пренебречь временем перехода из исходного пункта на тот или иной участок и временем перехода из одного участка в другой и считать главными параметрами вероятности p_i пребывания объекта на i -м участке и время T_i обследования i -го участка, то первым в оптимальной последовательности обхода участков должен быть участок, для которого отношение p_i/T_i имеет наибольшее значение [1, 3].

Таким образом, при несущественном упрощении исходных данных, можно предложить более простой способ определения оптимальной последовательности обхода участков, который дает значительное сокращение времени поиска объекта по сравнению с полным перебором методом ДП, что очень важно в экстремальных условиях.

Этой оптимальной последовательности соответствует расположение в убывающем порядке отношений p_i/T_i . В рассмотренном выше примере эти отношения равны:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{0,1}{7} = 0,014;$$

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{0,4}{5} = 0,08;$$

$$\frac{p_3}{T_3} = \frac{0,2}{4} = 0,05;$$

$$\frac{p_4}{T_4} = \frac{0,2}{10} = 0,02;$$

$$\frac{p_5}{T_5} = \frac{0,1}{2} = 0,05.$$

Отсюда получаются две оптимальные последовательности обхода участков района поиска объекта в зоне чрезвычайной ситуации: **2, 3, 5, 4, 1** или **2, 5, 3, 4, 1**. Первая последовательность совпадает с най-

денной оптимальной последовательностью обхода участков, полученной методом ДП и учитывающей различие в величинах T_{0i} и T_{ij} для разных i и j .

Вторая оптимальная последовательность по времени, затрачиваемому на обнаружение объекта, будет лишь незначительно уступать первой оптимальной последовательности (**15,98** ед. времени вместо **15,32** ед.). Наличие двух оптимальных последовательностей связано с тем, что на одном из шагов процесса ДП решения данной задачи возникло два равнозначных значения, из которых можно было выбрать любое. Наличие двух оптимальных равнозначных решений в методе ДП встречается довольно часто, но на окончательный результат никак не влияет.

Результаты и их обсуждение

Метод ДП позволяет значительно сократить количество вариантов (в данном примере 75) по сравнению с полным перебором всех возможных последовательностей обхода, число которых равно $5! = 120$ при $N = 5$. С увеличением числа участков N количество переборов резко возрастает. Можно показать, что при $N = 20$ потребуются перебрать девятизначное число вариантов и только семизначное число в методе ДП.

Приближенный способ отыскания оптимальной последовательности обхода участков при несущественном упрощении исходных данных доказан экспериментально на различных примерах и с различными исходными данными [1, 3]. Этот метод не требует перебора всех вариантов методом ДП, что значительно сократит время поиска в экстремальных условиях, и дает тот же самый результат.

Выводы

Математическое моделирование широко применяется с целью поддержки принятия управленческих решений в оперативной деятельности подразделений МЧС России [19, 20].

Анализ применения метода ДП и предложенного в статье приближенного способа для решения сформулированной задачи показал возможность их использования для нахождения оптимального плана обследования участков района поиска объекта в зоне ЧС в труднодоступном районе в кратчайшие сроки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Шипеев Б.С. Методика разработки оптимального плана обследования участков района поиска объектов в зоне чрезвычайной ситуации // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2020. № 3 (35). С. 30–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44070963>
2. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М. : Наука, 2009. 207 с.
3. Динер И.Я. Исследование операций. Л. : ВМА, 1969. 605 с.
4. Вагнер Г. Основы исследования операций / пер. с англ. М. : Мир, 1973. Т. 3. 504 с.

5. Дунаевский Е.Я., Жбанов А.В. Спасение на море. М. : Транспорт, 1991. 143 с.
6. Batkovskiy A.M., Semenova E.G., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya., Fomina A.V. Method for adjusting current appropriations under irregular funding conditions // *Journal of Applied Economic Sciences, Romania: European Research Centre of Managerial Studies in Business Administration*. 2016. Vol. XI. Issue 5 (43). Pp. 828–841.
7. Balychev S.Yu., Batkovskiy A.M., Kravchuk P.V., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Situational modeling of transportation problems: applied and didactic aspects // *Espacios*. 2018. Vol. 39. Issue 10. P. 27.
8. Modeling and simulation in engineering sciences / Akbar N.S., Beg O.A. (eds.). New York : iTexLi, 2016. 289 p. DOI: 10.5772/62109
9. Modeling, simulation and optimization for science and technology / Fitzgibbon W., Kuznetsov Yu.A., Neittaanmäki P., Pironneau O. (eds.). Amsterdam : Springer, 2014. 248 p. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3
10. Siddiqi A.H., Manchanda P., Bhardwaj R. Mathematical models, methods and applications. New York : Springer, 2015. 309 p. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8
11. Empirical modeling and its applications / Habib M. (ed.). New York : ExLi4EvA, 2016. 146 p. DOI: 10.5772/61406
12. Meerschaert M.M. Mathematical modeling. 4th ed. New York : Academic Press, 2013. 368 p.
13. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Хитов С.Б., Сильников М.В. Методика обоснования резерва запасных частей для работы специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2019. Т. 28. № 3. С. 6–13. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.6-13
14. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Хитов С.Б., Маслаков М.Д. Методика оценки риска отказа в работе специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2018. Т. 27. № 2–3. С. 5–13. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.5-13
15. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Хитов С.Б., Громов В.Н. Математическое моделирование сравнительного анализа двух тактических приемов по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ подразделениями МЧС России // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 10. С. 20–26.
16. Matrokhina K.V., Trofimets V.Y., Mazakov E.B., Makhovikov A.B., Khaykin M.M. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex // *Journal of Mining Institute* 2023. Vol. 259. Pp. 112–124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3
17. Mazakov E.B., Matrokhina K.V., Trofimets V.Y. Traffic management at the enterprises of the mineral industry // *Advances in raw material industries for sustainable development goals*. London : CRC Press, 2021. Pp. 397–405.
18. Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Computer modelling of physical processes described by parabolic type equations // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1047 (1). P. 012140. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012140
19. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Хитов С.Б. Математическое моделирование при планировании мероприятий на проведение взрывных работ на реках в паводковый период // *Современные тенденции развития науки и технологий*. 2016. № 6–1. С. 22–27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26301006>
20. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Хитов С.Б. Моделирование процесса распределения финансовых средств в интересах эффективной организации радиосвязи в МЧС России // *Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)*. 2018. № 1 (25). С. 22–28. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36317957>

REFERENCES

1. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Shepeev B.C. Technique for developing an optimal survey plan for areas of the search area of the object in the emergency zone. *Natural and technogenic risks (physical, mathematical and applied aspects)*. 2020; 3(35):30-36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44070963> (rus).
2. Wentzel E.S. *Operations research. Tasks, principles, methodology*. Moscow, Nauka Publ., 2009; 207. (rus).
3. Diener I.Ya. *Operations research*. Leningrad, Military Medical Academy, 1969; 605. (rus).
4. Wagner H.M. *Principles of operations research: With applications to managerial decisions*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1969.
5. Dunaevsky E.Ya. *Rescue at sea*. Moscow, Transport Publ., 1991; 143. (rus).
6. Batkovskiy A.M., Semenova E.G., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya., Fomina A.V. Method for adjusting current appropriations under irregular funding conditions. *Journal of Applied Economic Sciences, Romania: European Research Centre of Managerial Studies in Business Administration*. 2016; 5(XI):828-841.
7. Balychev S.Yu., Batkovskiy A.M., Kravchuk P.V., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Situational modeling of transportation problems: applied and didactic aspects. *Espacios*. 2018; 39(10):27.
8. *Modeling and simulation in engineering sciences*. Akbar N.S., Beg O.A. (eds.). New York, iTexLi, 2016; 289. DOI: 10.5772/62109

9. *Modeling, simulation and optimization for science and technology*. Fitzgibbon W., Kuznetsov Yu.A., Neittaanmäki P., Pironneau O. (eds.). Amsterdam, Springer, 2014; 248. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3
10. Siddiqi A.H., Manchanda P., Bhardwaj R. *Mathematical models, methods and applications*. New York, Springer, 2015; 309. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8
11. *Empirical modeling and its applications*. Habib M. (ed.). New York, ExLi4EvA, 2016; 146. DOI: 10.5772/61406
12. Meerschaert M.M. *Mathematical modeling*. 4th ed. New York, Academic Press, 2013; 368.
13. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Khitov S.B., Silnikov M.V. Methodology for justifying of the spare parts reserve for the work of special technical means in the course of emergency response. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(3):6-13. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.6-13 (rus).
14. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Khitov S.B., Maslarov M.D. Methodology of estimation of the failures' risks in the work of special technical means in emergency situations. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(2-3):5-13. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.5-13 (rus).
15. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Khitov S.B., Gromov V.N. Comparative analysis of two tactical procedures of fire exercise and carrying out emergency rescue operations by the fire divisions of the MES of Russia. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(10):20-26. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.20-26 (rus).
16. Matrokhina K.V., Trofimets V.Y., Mazakov E.B., Makhovikov A.B., Khaykin M.M. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. *Journal of Mining Institute*. 2023; 259:112-124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3
17. Mazakov E.B., Matrokhina K.V., Trofimets V.Y. Traffic management at the enterprises of the mineral industry. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. London, CRC Press, 2021; 397-405.
18. Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Computer modelling of physical processes described by parabolic type equations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1047(1):012140. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012140
19. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Khitov S.B. Mathematical modeling in the planning of activities for carrying out blasting operations on rivers during the flood period. *Modern Trends in the Development of Science and Technology*. 2016; 6-1:22-27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26301006> (rus).
20. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Khitov S.B. Modeling of the financial resources distribution's process in the interests of efficient organization of radio communication in the Emercom of Russia. *Natural and Man-made Risks (physical, mathematical and applied aspects)*. 2018; 1(25):22-28. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36317957> (rus).

Поступила 17.04.2023, после доработки 17.05.2023;

принята к публикации 01.06.2023

Received April 17, 2023; Received in revised form May 17, 2023;

Accepted June 1, 2023

Информация об авторах

КАМЕНЕЦКАЯ Наталия Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 831852; ResearcherID: P-7170-2019; ORCID: 0000-0002-8575-4877; e-mail: natkam53@mail.ru

КОРОЛЬКОВ Анатолий Павлович, канд. техн. наук, профессор кафедры системного анализа и антикризисного управления, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; ORCID: 0009-0001-3707-448X; e-mail: akorolkov@ro.ru

НЕФЕДЬЕВ Сергей Аркадьевич, д-р воен. наук, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов

Information about the authors

Nataliya V. KAMENETSKAYA, Cand. Sci. (Eng.), Docent of Higher Math and System Modeling of Complex Processes Department, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 831852; ResearcherID: P-7170-2019; ORCID: 0000-0002-8575-4877; e-mail: natkam53@mail.ru

Anatoliy P. KOROLKOV, Cand. Sci. (Eng.), Professor of Department of System Analysis and Crisis Management, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 0009-0001-3707-448X; e-mail: akorolkov@ro.ru

Sergey A. NEFEDEV, Doctor of Military Sciences, Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes and

и производств, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 57200560462; ORCID: 0000-0002-2299-4638; e-mail: doktorsan@mail.ru

МОТОРЫГИН Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 57200562602; ORCID: 0000-0002-2407-5061; e-mail: fire-risk@mail.ru

Вклад авторов:

Каменецкая Н.В. — *написание статьи.*

Корольков А.П. — *научное редактирование текста.*

Нефедьев С.А. — *научное редактирование текста.*

Моторыгин Ю.Д. — *обработка материала.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Production, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 57200560462; ORCID: 0000-0002-2299-4638; e-mail: doktorsan@mail.ru

Yuriy D. MOTORYGIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Criminalistics and Engineering Expertise, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 57200562602; ORCID: 0000-0002-2407-5061; e-mail: fire-risk@mail.ru

Contribution of the authors:

Nataliya V. Kamenetskaya — *writing an article.*

Anatoliy P. Korolkov — *scientific text editing.*

Sergey A. Nefedev — *scientific text editing.*

Yuriy D. Motorygin — *material processing.*

The authors declare that there is no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 4. С. 77–85
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(4):77-85

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.844

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.04.77-85>

Методика проведения экспериментального исследования тушения струйного горения газа автоматическими установками газопорошкового пожаротушения

Дмитрий Александрович Корольченко¹✉, Владимир Иванович Селивёрстов²,
 Александра Борисовна Саенкова²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

² ООО «Каланча Инжиниринг», г. Сергиев Посад, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время в РФ активно осуществляется проектирование и строительство объектов обращения сжиженного природного газа (СПГ). Аварии на данных объектах, как правило, начинаются с разгерметизации оборудования, истечения и последующего возгорания горючих веществ. В результате воздействия опасных факторов пожара от первичной аварии возможно разрушение соседнего оборудования и каскадное развитие аварии. В основном, опубликованные работы, посвященные тушению СПГ, рассматривают вопросы тушения или локализации пролива СПГ. Вопросы, связанные с тушением пожара горючих газов, истекающих под давлением, мало изучены.

Цель. Разработка методики проведения огневых испытаний при тушении струйного горения газа.

Задачи. Обзор результатов проведенных экспериментов со струйным истечением СПГ; анализ частоты возникновения утечек и их наиболее вероятный диаметр; определение параметров модельного очага струйного пожара; определение параметров испытательного стенда и порядка проведения огневых испытаний.

Аналитическая часть. Методика разработана на основе анализа статистических данных по авариям на нефтехимическом оборудовании. На основе данных по частоте разгерметизации технологического оборудования и наиболее вероятного эквивалентного диаметра аварийного отверстия определены параметры испытательного стенда для проведения испытаний по тушению струйного горения СПГ.

Выводы. Сделан обзор результатов проведенных экспериментов со струйным истечением СПГ, а также анализ частоты возникновения утечек и их наиболее вероятный диаметр. На основе данного анализа определены параметры испытательного стенда и предложен порядок проведения огневых испытаний. Разработана методика проведения испытаний при тушении струйного горения для определения огнетушащей эффективности модулей пожаротушения.

Ключевые слова: модуль пожаротушения; методика испытаний; сжиженный природный газ; факельное горение; струйное горение

Для цитирования: Корольченко Д.А., Селивёрстов В.И., Саенкова А.Б. Методика проведения экспериментального исследования тушения струйного горения газа автоматическими установками газопорошкового пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 77–85. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.77-85

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: ikbs@mgsu.ru

Methodology for experimental investigation of gas jet fire suppression using automatic gas-powder fire extinguishing systems

Dmitriy A. Korolchenko¹✉, Vladimir I. Seliverstov², Alexandra B. Saenkova²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

² Kalancha Engineering LLC, Sergiev Posad, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, the design and construction of liquefied natural gas (LNG) facilities are actively taking place in the Russian Federation. Accidents at these facilities typically start with equipment leaks, followed by the release and subsequent ignition of flammable substances. The impact of such fire hazards can lead to the destruction of adjacent equipment and cascading accidents. Existing literature on LNG fire suppression mainly focuses on extinguishing or containing LNG spills. However, there is limited research on fire suppression of pressurized combustible gases.

This publication **aims** are to develop a methodology for conducting fire tests on gas jet fire suppression. The **tasks** include reviewing the results of previous experiments on jet releases of LNG, analyzing the frequency of leaks and their most probable diameter, determining the parameters of the model fire source, defining the parameters of the test setup, and outlining the procedure for conducting fire tests.

Analytical part. The methodology is developed based on the analysis of statistical data on accidents in the petrochemical industry. Parameters of the test setup for conducting LNG jet fire suppression tests are determined using data on the frequency of equipment leaks and the most probable equivalent diameter of the accidental openings.

Conclusions. A review of previous experiments on LNG jet releases and an analysis of leak frequencies and their most probable diameters have been conducted. Based on this analysis, parameters for the test setup and a procedure for conducting fire tests have been proposed. A methodology for conducting fire tests on gas jet fire suppression to determine the fire extinguishing effectiveness of fire suppression modules has been developed.

Keywords: fire suppression module; test methodology; liquefied natural gas; flare combustion; jet fire

For citation: Korolchenko D.A., Seliverstov V.I., Saenkova A.B. Methodology for experimental investigation of gas jet fire suppression using automatic gas-powder fire extinguishing systems. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4):77-85. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.77-85 (rus).

✉ Dmitry Aleksandrovich Korolchenko, e-mail: ikbs@mgmsu.ru

Введение

В настоящее время на территории Российской Федерации активно развивается рынок СПГ, идет строительство сети криогенных заправок станций (Крио-АЗС) и комплексов по сжижению природного газа. До 2025 г. планируется увеличить количество действующих объектов газозаправочной СПГ-инфраструктуры в 3 раза по сравнению с 2022 г.¹ В то же время увеличиваются поставки СПГ на внешние рынки, осуществляется строительство СПГ-заводов в арктической зоне, ориентированных на экспорт². Одновременно ведется работа по актуализации и развитию нормативной базы, содержащей требования по пожарной безопасности для объектов СПГ^{3, 4, 5}.

В мире технология СПГ развивается и активно применяется для транспортирования природного газа морскими путями уже более 50 лет.

За эти годы был проведен ряд испытаний, направленных на исследования свойств СПГ при горении. В основном проводилось два типа исследований: пожар пролива СПГ в очаг фиксированного размера и пролив СПГ, свободно растекающийся по поверхности воды. Диаметр очага для первого варианта варьируется от 2 до 35 м в зависимости от серии опытов [1, 2].

В работах [3–7] приведены данные по тушению пролива СПГ пенами высокой кратности. Проведенные исследования показывают, что пена высокой кратности может снизить тепловой поток от пламени и уменьшить испарение паров с поверхности, однако полного тушения СПГ не происходит.

СПГ хранится и транспортируется по трубам под давлением. Поэтому при разгерметизации оборудования через отверстие СПГ будет вытекать под давлением и формировать струю. При свободном

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.02.2021 № 350-п. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102180025?index=6&rangeSize=1>

² GIIGNL — International Group of Liquefied Natural Gas Importers. The LNG Industry GIIGNL Annual Report 2022; GIIGNL: Neuilly-sur-Seine, France, 2022. URL: https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/standardization/notification/notificationssetrules?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_r00ABXeDAAZsZW5ndGgAAAABAAIxMAAGYWN0aW9uAAAAAQAMbm90aWZpY2F0aW9uAAJpZAAAAAEABiA2MzE5MgAEcGFhZQAAAAEAATAABHRIeHQAAAAABAAjRgdC_IDI0MAAFc3RhdGUAAAAABAAZBQ1RVQUwABHR5cGUAAAAABAAAAB19fRU9GX18*&portal:componentId=5bb1aa96-ad4f-4e66-afe1-a7d403577940

³ Уведомление о разработке проекта свода правил Изменения № 1 СП 240.1311500.2015 «Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности». URL: https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/standardization/notification/notificationssetrules?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_r00ABXeDAAZsZW5ndGgAAAABAAIxMAAGYWN0aW9uAAAAAQAMbm90aWZpY2F0aW9uAAJpZAAAAAEABiA2MzE5MgAEcGFhZQAAAAEAATAABHRIeHQAAAAABAAjRgdC_IDI0MAAFc3RhdGUAAAAABAAZBQ1RVQUwABHR5cGUAAAAABAAAAB19fRU9GX18*&portal:componentId=5bb1aa96-ad4f-4e66-afe1-a7d403577940

⁴ Уведомление о разработке проекта свода правил Изменения № 1 СП 326.1311500.2017 «Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности». URL: https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/standardization/notification/notificationssetrules?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_r00ABXeDAAZsZW5ndGgAAAABAAIxMAAGYWN0aW9uAAAAAQAMbm90aWZpY2F0aW9uAAJpZAAAAAEABiA2MjE5MgAEcGFhZQAAAAEAATAABHRIeHQAAAAABAAjRgdC_IDMyNgAFc3RhdGUAAAAABAAZBQ1RVQUwABHR5cGUAAAAABAAAAB19fRU9GX18*&portal:componentId=5bb1aa96-ad4f-4e66-afe1-a7d403577940

⁵ Уведомление о разработке проекта свода правил СП «Бункеровка водного транспорта сжиженным природным газом. Требования пожарной безопасности». URL: https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/standardization/notification/notificationssetrules?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_r00ABXeDAAZsZW5ndGgAAAABAAIxMAAGYWN0aW9uAAAAAQAMbm90aWZpY2F0aW9uAAJpZAAAAAEABiA2MzE5MgAEcGFhZQAAAAEAATAABHRIeHQAAAAABAAjRgdC_IDMyNgAFc3RhdGUAAAAABAAZBQ1RVQUwABHR5cGUAAAAABAAAAB19fRU9GX18*&portal:componentId=5bb1aa96-ad4f-4e66-afe1-a7d403577940

истечении СПГ под давлением через отверстия не наблюдалось формирование пролива СПГ [2, 8]. При наличии препятствий на пути струи СПГ выпадает на поверхность и образуется пролив. При горизонтальном истечении СПГ без воспламенения при массовом расходе 5 кг/с через отверстие диаметром 25 мм при давлении от 3,5 до 7 бар зона с концентрацией метана более 5 % измеряется на расстоянии 80 м по направлению выброса. При вертикальном выбросе СПГ в условиях слабого ветра легковоспламеняющееся облако может опуститься до уровня земли, но выпадение капель СПГ зафиксировано не было. При воспламенении длина пламени достигала 25 м при массовой скорости выброса 5 кг/с [2].

В работе [9] описаны испытания с поджогом струй СПГ. Были проанализированы длина, форма и температура факела пламени при разном массовом расходе СПГ. Диаметр сопла во всех опытах составлял 10 мм, давление менялось в пределах 5,2–10,1 бар. В опыте с массовым расходом СПГ 0,02 кг/сек и давлением 5,5 бар наблюдалось выпадение капель СПГ из факела и образование пролива на поверхности земли.

В серии экспериментов (Coyote series tests) облако паров СПГ поджигалось с помощью горячей струи смеси пропана с воздухом, но существенного влияния на характер горения облака СПГ отмечено не было [1, 10]. Скорость распространения пламени по облаку СПГ уменьшается по мере удаления от источника воспламенения, и избыточное давление наблюдалось лишь в несколько миллибар.

В работах [11–19] представлены данные по проведению огневых испытаний при выпуске горючих газов под давлением. В работе [15] проводились эксперименты с природным газом и смесью природного газа с водородом. Газ выпускался из отверстий диаметром 20, 35 и 50 мм под давлением около 60 бар, расход газа находился в пределах от 3 до 20 кг/сек. При этом длина пламени доходила до 50 м.

В работах [20, 21] проведен анализ данных аварий, в которых было зафиксировано струйное воспламенение. На основе частоты реализации различных сценариев протекания аварий было построено дерево событий. Примерно в 50 % случаев струйный пожар вызывает другое событие с серьезными последствиями, т.е. авария развивается по принципу домино. В работе [22] отмечено, что возникновение струйного горения СПГ может привести к катастрофическим последствиям.

Таким образом, разгерметизация оборудования, утечка СПГ под давлением и его дальнейшее воспламенение приводят к риску каскадного развития

аварии. При этом исследования по тушению такого рода пожаров не проводились. В связи с чем разработка методики исследования тушения струйного горения газа и проведения соответствующих испытаний для различных видов огнетушащих веществ является актуальной задачей.

Целью данной публикации является разработка методики проведения огневых испытаний при тушении струйного горения газа. Для этого решаются следующие задачи: обзор результатов проведенных экспериментов со струйным истечением СПГ, анализ частоты возникновения утечек

Таблица 1. Частота разгерметизации оборудования
Table 1. Frequency of equipment depressurization

Оборудование Equipment	Частота возникновения утечек (случаев на единицу оборудования в год) Frequency of leaks (cases per unit of equipment per year)	
	эквивалентный диаметр отверстия ≥ 1 мм equivalent hole diameter ≥ 1 mm	эквивалентный диаметр отверстия ≥ 50 мм equivalent hole diameter ≥ 50 mm
Технологический сосуд Technological vessel	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Центробежный насос Centrifugal pump	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
Поршневой насос Piston pump	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$
Центробежный компрессор Centrifugal compressor	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Поршневой компрессор Piston compressor	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Теплообменник (оболочковый) Heat exchanger (shell)	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Теплообменник (труба в трубе) Heat exchanger (pipe in pipe)	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$
Теплообменник (пластинчатый) Heat exchanger (plate)	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$
Теплообменник (с воздушным охлаждением) Heat exchanger (air-cooled)	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$
Фильтр Filter	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$

⁶ СТО Газпром 2-2.3-569–2011. Методическое руководство по расчету и анализу рисков при эксплуатации объектов производства, хранения и морской транспортировки сжиженного и сжатого природного газа. ООО «Газпром», 2011.

Таблица 2. Параметры очага струйного пожара СПГ
Table 2. Parameters of the LNG jet fire source

Параметр Parameter	Значение Value
Условный диаметр отверстия, мм Nominal diameter of the hole, mm	25
Агрегатное состояние истекающего продукта Aggregate state of the expiring product	Жидкая фаза и пары Liquid phase and vapors
Расход горючего, не более, кг/с Fuel consumption, not more than, kg/s	5
Характер отверстия The nature of the hole	Круглое Round
Направление истечения Direction of expiration	Горизонтально Horizontal
Давление подачи, МПа Supply pressure, MPa	0,12

и их наиболее вероятный диаметр; определение параметров модельного очага струйного пожара; определение параметров испытательного стенда и порядка проведения огневых испытаний.

Аналитическая часть.

Разработка методики проведения испытаний

Определение параметров испытательного стенда

Для проведения адекватных огневых испытаний установки пожаротушения необходимо смоделировать очаг пожара, который наиболее вероятен и характерен для объекта защиты.

Согласно данным, представленным в табл. 1, наиболее вероятны утечки с диаметром менее 50 мм.

Оборудование на объектах малотоннажного производства и потребления СПГ, на котором возможны утечки, — баллоны для хранения сжатого природного газа (КПГ), резервуары для хранения СПГ, регуляторы давления, запорная арматура, трубопроводы, компрессоры, насосы, оборудование для газификации СПГ, узлы залива и слива СПГ.

Согласно данным, представленным в [23], наиболее вероятна утечка диаметром 2 мм и более, 97 % утечек приходится на диаметр отверстия менее 22 мм. В работе [24] также отмечено, что наибольшая вероятность образования утечки из отверстий менее 50 мм. При горизонтальном истечении СПГ риск попадания в зону теплового воздействия факела пожара соседнего оборудования наиболее вероятен.

Таким образом, можно предложить следующие параметры модельного очага струйного пожара СПГ (представлены в табл. 2).

Таблица 3. Технические характеристики модуля пожаротушения
Table 3. Technical characteristics of the fire extinguishing module

Наименование параметра Name of the parameter	Значение Value
Обозначение модуля Module designation	МГПП-110-CO2-30- PX-ABCE-Y2 MGPP-110-CO2-30- RH-ABCE-U2
Защищаемый объем, м³ Protected volume, m³	110
Класс пожара А Fire class A	900
Класс пожара В Fire class B	600
Классы пожаров Classes of fires	A, B, C, E
Огнетушащее вещество Extinguishing agent	Газопорошковое Gas powder
Температурный диапазон эксплуатации, °С Operating temperature range, °C	От минус 50 до плюс 50 From minus 50 to plus 50
Полная масса модуля, не более, кг The total weight of the module, not more than, kg	365
Масса применяемого огне- тушащего порошка «Феникс ABCE-70», не менее, кг The mass of the applied fire extinguishing powder “Phoenix ABCE-70”, kg, not less than	80
Масса применяемого рабо- чего газа — двуокиси угле- рода жидкой, не менее, кг The mass of the working gas used is liquid carbon dioxide, not less than, kg	30
Быстродействие модуля, не более, сек Module performance, no more than, sec	1
Время подачи огнетушащего вещества, не более, сек Time of fire extinguishing agent supply, no more than, seconds	10
Габаритные размеры, ширина × глубина × высота, мм Overall dimensions, width × depth × height, mm	630 × 670 × 1740
Срок службы, не менее, лет Service life, not less than, years	20
Производитель Manufacturer	ООО «Каланча» LLC “Kalancha”

Объект испытаний

Модули газопорошкового пожаротушения успешно прошли испытания и применяются для защиты объектов нефтехимической промышленности уже более 20 лет^{7, 8} [25]. Для защиты технологического оборудования, установленного на открытых площадках, подача огнетушащего вещества осуществляется с четырех сторон для компенсации влияния ветра и создания огнетушащей концентрации на время, достаточное для тушения очага пожара. Так как технология газопорошкового пожаротушения является объемной, то не имеет значения, в какой точке защищаемого пространства происходит утечка и в каком направлении будет сконцентрировано пламя. Порошок, распределенный в объеме, будет попадать в зону горения вместе с потоком воздуха и осуществлять тушение. Для проведения данных испытаний планируется использовать модуль с раздельным хранением компонентов МГПП-110-CO2-30-PX-ABCE-Y2. Основные характеристики модуля приведены в табл. 3.

Цель экспериментального исследования: подтверждение огнетушащей эффективности модулей

⁷ Патент WO 2007117168 (A1). Fire-extinguishing gas-dispersed composition, a fire-fighting method and a device for carrying out said method, A62C13/66; A62C2/00; A62D1/06, WO 2006RU00167 20060407; 18.10.2007 / Seliverstov V.I., Stenkovoy V.I., Veretinsky P.G. et. al.

⁸ Патент № 2362599 C1 Российская Федерация, МПК A62C 2/00, A62D 1/00, A62C 35/02. Огнетушащий газодисперсный состав, способ тушения пожара и устройство для его осуществления: № 2007147314/12, заявл. 21.12.2007, опубл. 27.07.2009 / В.И. Селиверстов, В.И. Стенковой, П.Г. Веретинский и др.: пат. RU 2362599C1 USA.

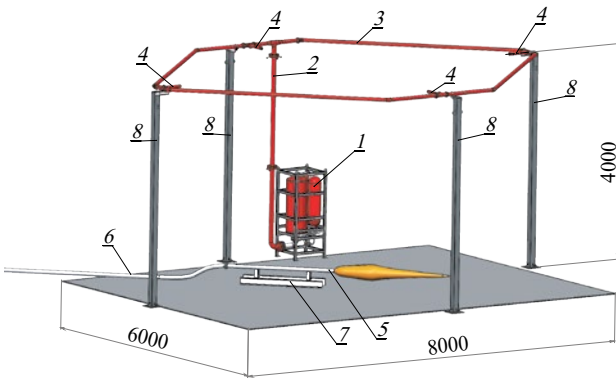


Схема испытательного стенда: 1 — модуль газопорошкового пожаротушения; 2 — магистральный трубопровод подачи ГПОВ; 3 — кольцевой трубопровод подачи ГПОВ; 4 — насадка распыления ГПОВ; 5 — сопло; 6 — трубопровод подачи СПГ; 7 — опора; 8 — опора трубопровода ГПОВ

Diagram of the test stand: 1 — gas-powder fire extinguishing module; 2 — main pipeline for supplying GPOV; 3 — annular pipeline for supplying GPOV; 4 — GPOV spray nozzles; 5 — nozzle; 6 — LNG supply pipeline; 7 — support; 8 — support of the GPOV pipeline

Таблица 4. Перечень используемых для экспериментальных исследований средств измерений

Table 4. List of measuring instruments used for experimental studies

Наименование средства измерения Name of measuring instrument	Диапазон измерений Measurement range	Класс точности, погрешность измерений Accuracy class, measurement error
Преобразователи термоэлектрические кабельные КТХА Thermoelectric cable converters KTXA	(–40 ... +1100) °C	Класс точности 1 Accuracy class 1

Измеритель параметров микроклимата «МЕТЕОСКОП-М»

Meter of microclimate parameters "METEOSKOP-M"

Измерение температуры Temperature measurement	(–40 ... +85) °C	± 0,2 °C
Измерение влажности Humidity measurement	(5 ... 97) %	± 3 %
Измерение давления воздуха Air pressure measurement	(80 ... 110) кПа (80 ... 110) kPa	± 0,13 кПа ± 0.13 kPa
Скорость воздушного потока Air flow velocity	(0,1 ... 20) м/с (0.1 ... 20) m/s	± (0,1 + 0,05 V), где V — значение измеряемой скорости, м/с ± (0.1 + 0.05 V), where V is the value of the measured velocity, m/s

газопорошкового пожаротушения при струйном горении СПГ на открытых технологических установках.

Схема испытательного стенда

На рисунке представлена схема проведения эксперимента по тушению струйного возгорания с помощью установки газопорошкового пожаротушения. Модельный очаг представляет собой сопло 5 с диаметром выходного отверстия 25 мм. Сопло расположено в центре защищаемого пространства и жестко закреплено на опоре 7. По трубопроводу 6 осуществляется подача СПГ на сопло. Подача осуществляется с помощью насоса. Массовая скорость подачи находится в пределах до 5 кг/с. Модуль пожаротушения 1 устанавливается вблизи испытательного стенда, но так,

чтобы на него не оказывалось прямого воздействия пламени. Модуль подключается к магистральному трубопроводу 2, далее идет кольцевой коллектор 3. Кольцевой коллектор применяется для равномерной подачи огнетушащего вещества из четырех насадков распыления 4. Насадки расположены на высоте и закреплены на опорах 8.

В зоне пламени устанавливаются термодатчики для измерения температуры пламени и фиксации результатов тушения. Дополнительно ведется фиксация испытаний на видеоаппаратуру. Перечень средств измерений указан в табл. 4.

Порядок проведения испытаний

При проведении экспериментального исследования необходимо выполнить шаги в следующей последовательности:

- проверяется работоспособность всех средств управления и обеспечения безопасности исследования (клапаны, запорная арматура и т.п.);
 - проверяется работоспособность всех измерительных средств;
 - перед испытаниями систему трубопроводов подачи СПГ заполняют жидким азотом для охлаждения и проверки на наличие утечек в соединениях;
 - открывается вентиль подачи СПГ;
 - после подачи СПГ на сопло производится поджог струи открытым пламенем или высоковольтным искровым разрядом;
 - устанавливается требуемый расход СПГ до 5 кг/с;
 - после достижения устойчивого и стабильного горения производится ручной пуск модуля;
 - через 5 с прекращается подача СПГ для предотвращения загазованности испытательной площадки;
 - производится фиксация результатов испытаний.
- Испытания считаются успешными, если произошло тушение пламени и не было повторного возгорания в течение минуты после срабатывания модуля.
- В ходе испытаний регистрируются следующие параметры:
- скорость и направление ветра;
 - расход и давление подачи СПГ;
 - время выхода СПГ и ГПОВ;
 - время тушения;
 - температура в зоне струйного горения.
- Определение тушения осуществляется визуально (по данным видеофиксации) — не должно наблюдаться открытого пламени факела. Также критерием тушения является снижение показаний термодатчиков до температуры ниже температуры самовоспламенения природного газа, равной 537 °С.

Выводы

Проведен обзор результатов проведенных экспериментов со струйным истечением СПГ, сделан анализ частоты возникновения утечек и их наиболее вероятный диаметр. На основе данного анализа были определены параметры испытательного стенда и предложен порядок проведения огневых испытаний.

Разработана методика проведения испытаний при тушении струйного горения для определения огнетушащей эффективности модулей пожаротушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Raj P.K. LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 140. Issue 3. Pp. 444–464. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.029
2. Cleaver P., Johnson M., Ho B. A summary of some experimental data on LNG safety // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 140. Issue 3. Pp. 429–438. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.047
3. Suardin J.A., Wang Y., Willson M., Mannan M. Field experiments on high expansion (HEX) foam application for controlling LNG pool fire // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 165. Issue 1–3. Pp. 612–622. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.040
4. Yun G., Ng D., Mannan M.S. Key findings of liquefied natural gas pool fire outdoor tests with expansion foam application // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. Vol. 50. Issue 4. Pp. 2359–2372. DOI: 10.1021/ie101365a
5. Yun G., Ng D., Mannan M.S. Key Observations of Liquefied Natural Gas Vapor Dispersion Field Test with Expansion Foam Application // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. Vol. 50. Issue 3. Pp. 1504–1514. DOI: 10.1021/ie100822h
6. Zhang Z., Krishnan P., Jiao Z., Mannan M., Wang Q. Developing a CFD heat transfer model for applying high expansion foam in an LNG spill // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 71. P. 104456. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104456
7. Yang J., Li Y., Zhu J., Han H. Quantitative study of the factors of LNG liquid foam stability: Operating parameters and collection containers and time // Process Safety and Environmental Protection. 2018. Vol. 117. Pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.psep.2018.05.005
8. Luketa-Hanlin A. A review of large-scale LNG spills: experiments and modeling // Journal of Hazardous Materials. 2006. Vol. 132. Issue 2. Pp. 119–140. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.10.008

9. Zhang Q., Liang D., Wen J. Experimental study of flashing LNG jet fires following horizontal releases // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 57. Pp. 245–253. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.12.007
10. Koopman R.P., Ermak D.L. Lessons learned from LNG safety research // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 140. Issue 3. Pp. 412–428. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.042
11. Lu H., Delichatsios M.A., Li X., Liu S., Lv J., Hu L. Flame geometrical characteristics of downward sloping buoyant turbulent jet fires // *Fuel*. 2019. Vol. 257. P. 116112. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.06.227
12. Hu L., Wang Q., Delichatsios M.A., Tang F., Zhang X., Lu S. Flame height and lift-off of turbulent buoyant jet diffusion flames in a reduced pressure atmosphere // *Fuel*. 2013. Vol. 109. Pp. 234–240. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.12.050
13. Zhang X., Hu L., Zhang X., Tang F., Jiang Y., Lin Y. Flame projection distance of horizontally oriented buoyant turbulent rectangular jet fires // *Combustion and Flame*. 2017. Vol. 176. Pp. 370–376. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.10.016
14. Bradley D., Gaskell P.H., Gu X., Palacios A. Jet flame heights, lift-off distances, and mean flame surface density for extensive ranges of fuels and flow rates // *Combustion and Flame*. 2016. Vol. 164. Pp. 400–409. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.09.009
15. Lowesmith B.J., Hankinson G. Large scale high pressure jet fires involving natural gas and natural gas/hydrogen mixtures // *Process Safety and Environmental Protection*. 2012. Vol. 90. Issue 2. Pp. 108–120. DOI: 10.1016/j.psep.2011.08.009
16. Gopalaswami N., Liu Y., Laboureux D.M., Zhang B., Mannan M.S. Experimental study on propane jet fire hazards: Comparison of main geometrical features with empirical models // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. Vol. 41. Pp. 365–375. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.003
17. Laboureux D.M., Gopalaswami N., Zhang B., Liu Y., Mannan M.S. Experimental study on propane jet fire hazards: Assessment of the main geometrical features of horizontal jet flames // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. Vol. 41. Pp. 355–364. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.013
18. Palacios A., Rengel B. Flame shapes and thermal flux of vertical hydrocarbon flames // *Fuel*. 2020. Vol. 276. P. 118046. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118046
19. Palacios A., García W., Rengel B. Flame shapes and thermal fluxes for an extensive range of horizontal jet flames // *Fuel*. 2020. Vol. 279. P. 118328. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118328
20. Gómez-Mares M., Luis Z., Joaquim C. Jet fires and the domino effect // *Fire Safety Journal*. 2008. Vol. 43. № 8. Pp. 583–588.
21. Casal J., Gómez-Mares M., Messineo M.A.M., Muñoz Messineo M.A. Jet fires: a “minor” fire hazard? // *Chemical Engineering Transactions*. 2012. Vol. 26. Pp. 13–20. DOI: 10.3303/CET1226003
22. Zwęgliński T. Conventional event tree analysis on emergency release of liquefied natural gas: 5 // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. Issue 5. P. 2961. DOI: 10.3390/ijerph19052961
23. Selvan R.T., Siddiqui N.A. Risk assessment of natural gas gathering station & pipeline network // *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2017. Vol. 12. Issue. 2. Pp. 227–242.
24. Fitzgerald G.A. Calculating facility siting study leak sizes-one size does not fit all // *Process Safety Progress*. 2016. Vol. 35. Issue 2. Pp. 176–178. DOI: 10.1002/prs.11764
25. Стенковой В.И., Селиверстов В.И., Молчадский И.С., Баратов А.Н. Газопорошковое тушение пожаров нефтепродуктов в резервуарах // *Пожарная безопасность*. 2011. № 1. С. 100–106. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15608220>

REFERENCES

1. Raj P.K. LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 140(3):444–464. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.029
2. Cleaver P., Johnson M., Ho B. A summary of some experimental data on LNG safety. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 140(3):429–438. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.047
3. Suardin J.A., Wang Y., Willson M., Mannan M. Field experiments on high expansion (HEX) foam application for controlling LNG pool fire. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 165(1-3):612–622. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.040
4. Yun G., Ng D., Mannan M.S. Key findings of liquefied natural gas pool fire outdoor tests with expansion foam application. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011; 50(4):2359–2372. DOI: 10.1021/ie101365a
5. Yun G., Ng D., Mannan M.S. Key observations of liquefied natural gas vapor dispersion field test with expansion foam application. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011; 50(3):1504–1514. DOI: 10.1021/ie100822h

6. Zhang Z., Krishnan P., Jiao Z., Mannan M., Wang Q. Developing a CFD heat transfer model for applying high expansion foam in an LNG spill. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104456. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104456
7. Yang J., Li Y., Zhu J., Han H. Quantitative study of the factors of LNG liquid foam stability: Operating parameters and collection containers and time. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018; 117:223-231. DOI: 10.1016/j.psep.2018.05.005
8. Luketa-Hanlin A. A review of large-scale LNG spills: experiments and modeling. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; 132(2):119-140. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.10.008
9. Zhang Q., Liang D., Wen J. Experimental study of flashing LNG jet fires following horizontal releases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 57:245-253. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.12.007
10. Koopman R.P., Ermak D.L. Lessons learned from LNG safety research. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 140(3):412-428. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.042
11. Lu H., Delichatsios M.A., Li X., Liu S., Lv J., Hu L. Flame geometrical characteristics of downward sloping buoyant turbulent jet fires. *Fuel*. 2019; 257:116112. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116112
12. Hu L., Wang Q., Delichatsios M.A., Tang F., Zhang X., Lu S. Flame height and lift-off of turbulent buoyant jet diffusion flames in a reduced pressure atmosphere. *Fuel*. 2013; 109:234-240. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.12.050
13. Zhang X., Hu L., Zhang X., Tang F., Jiang Y., Lin Y. Flame projection distance of horizontally oriented buoyant turbulent rectangular jet fires. *Combustion and Flame*. 2017; 176:370-376. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.10.016
14. Bradley D., Gaskell P.H., Gu X., Palacios A. Jet flame heights, lift-off distances, and mean flame surface density for extensive ranges of fuels and flow rates. *Combustion and Flame*. 2016; 164:400-409. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.09.009
15. Lowesmith B.J., Hankinson G. Large scale high pressure jet fires involving natural gas and natural gas/hydrogen mixtures. *Process Safety and Environmental Protection*. 2012; 90(2):108-120. DOI: 10.1016/j.psep.2011.08.009
16. Gopalaswami N., Liu Y., Laboureur D.M., Zhang B., Mannan M.S. Experimental study on propane jet fire hazards: Comparison of main geometrical features with empirical models. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 41:365-375. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.003
17. Laboureur D.M., Gopalaswami N., Zhang B., Liu Y., Mannan M.S. Experimental study on propane jet fire hazards: Assessment of the main geometrical features of horizontal jet flames. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 41:355-364. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.013
18. Palacios A., Rengel B. Flame shapes and thermal flux of vertical hydrocarbon flames. *Fuel*. 2020; 276:118046. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118046
19. Palacios A., García W., Rengel B. Flame shapes and thermal fluxes for an extensive range of horizontal jet flames. *Fuel*. 2020; 279:118328. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118328
20. Gómez-Mares M., Luis Z., Joaquim C. Jet fires and the domino effect. *Fire Safety Journal*. 2008; 43(8):583-588.
21. Casal J., Gómez-Mares M., Messineo M.A.M., Muñoz Messineo M.A. Jet fires: a “minor” fire hazard? *Chemical Engineering Transactions*. 2012; 26:13-20. DOI: 10.3303/CET1226003
22. Zwęgliński T. Conventional event tree analysis on emergency release of liquefied natural gas: 5. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022; 19(5):2961. DOI: 10.3390/ijerph19052961
23. Selvan R.T., Siddiqui N.A. Risk assessment of natural gas gathering station & pipeline network. *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2017; 12(2):227-242.
24. Fitzgerald G.A. Calculating facility siting study leak sizes-one size does not fit all. *Process Safety Progress*. 2016; 35(2):176-178. DOI: 10.1002/prs.11764
25. Stenkovoy V.I., Seliverstov V.I., Molchadskiy I.S., Baratov A.N. Gas-powder fire extinguishing of oil products in the tanks. *Fire safety*. 2011; 1:100-106. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15608220> (rus).

Поступила 22.06.2023, после доработки 07.07.2023;

принята к публикации 17.07.2023

Received June 22, 2023; received in revised form July 7, 2023;

accepted July 17, 2023

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, доцент, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067;

Information about the authors

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600;

Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

СЕЛИВЁРСТОВ Владимир Иванович, канд. техн. наук, генеральный конструктор, ООО «Каланча Инжиниринг», Россия, 141300, Московская область, г. Сергиев Посад, Скобяное шоссе, 3; РИНЦ ID: 975258; ResearcherID: IUP-8784-2023; ORCID: 0000-0002-8830-2366; e-mail: svi@kalancha.ru

САЕНКОВА Александра Борисовна, заместитель генерального конструктора, ООО «Каланча Инжиниринг», Россия, 141300, Московская область, г. Сергиев Посад, Скобяное шоссе, 3; РИНЦ ID: 1108799; ResearcherID: IUP-7179-2023; ORCID: 0000-0001-6502-6904; e-mail: asaenkova@kalancha.ru

Вклад авторов:

Корольченко Д.А. — научное руководство, разработка концепции статьи, окончательное утверждение версии статьи для публикации.

Селивёрстов В.И. — разработка концепции статьи.

Саенкова А.Б. — разработка концепции статьи, обзор публикации по теме статьи, написание текста статьи, подготовка графического материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Vladimir I. SELIVERSTOV, Cand. Sci. (Eng.), General Designer, Kalancha Engineering LCC Skobyano Highway, 3, Moscow Region, Sergiev Posad, 141300, Russian Federation; ID RISC: 975258; ResearcherID: IUP-8784-2023; ORCID: 0000-0002-8830-2366; e-mail: svi@kalancha.ru

Alexandra B. SAENKOVA, Deputy General Designer, Kalancha Engineering LCC Skobyano Highway, 3, Moscow Region, Sergiev Posad, 141300, Russian Federation; ID RISC: 1108799; ResearcherID: IUP-7179-2023; ORCID: 0000-0001-6502-6904; e-mail: asaenkova@kalancha.ru

Contribution of the authors:

Dmitriy A. Korolchenko — scientific management, the development of the article concept, final approval of the version of the article for publication.

Vladimir I. Seliverstov — the development of the article concept.

Alexandra B. Saenkova — the development of the article concept, review of publications on the topic of the article, writing the text of the article, preparing the graphical material.

The authors declare no conflicts of interests.

Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 4

Александр Сергеевич Харламенков ✉

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Представлены статистические данные, отражающие состояние парка электромобилей в России. Дано описание основных сложностей, возникающих у подразделений пожарной охраны при тушении тяговых литий-ионных батарей электромобилей. Выполнен анализ существующих систем пожаротушения электромобилей, успешно применяемых в ряде зарубежных стран. Показана техническая возможность проведения эффективного тушения аккумуляторного блока с помощью воды при ее подаче непосредственно во внутреннее пространство батареи. Рассмотрены способы обеспечения пожарной безопасности в случае повторного возгорания аккумулятора электромобиля с выполнением полного погружения последнего в емкость с водой, а также покрытия кузова противопожарным полотном.

Ключевые слова: электромобиль; защита; пожарный ствол; огнетушащее копьё; гидроабразивная резка; руководство пользователя; инструкция

Для цитирования: Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 4 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 86–91. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.86-90

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

Modern methods of extinguishing lithium-ion batteries. Part 4

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Statistical data reflecting the state of the electric vehicle fleet in Russia are presented. The description of the main difficulties arising for firefighting departments when extinguishing traction lithium-ion batteries of electric vehicles is given. The existing fire extinguishing systems for electric vehicles successfully used in a number of foreign countries are analyzed. The technical possibility of effective extinguishing of the battery pack with the help of water when it is supplied directly into the internal space of the battery is shown. The ways of ensuring fire safety in case of repeated ignition of an electric car battery with performance of full immersion of the latter in a container with water, and also covering the body with a fireproof cloth are considered.

Keywords: electric vehicle; protection; fire barrel; fire extinguishing lance; waterjet cutting; user manual; instruction

For citation: Kharlamenkov A.S. Modern methods of extinguishing lithium-ion batteries. Part 4. *Pozharovzryvo-bezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4):86–90 (rus.). DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.86-90 (rus.).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru

ВОПРОС



В рубрике «Вопрос – ответ» журнала № 3 за 2023 г. [1] была отмечена необходимость разработки единого порядка действий собственников и пожарных подразделений при нарушениях в работе аккумуляторного блока электромобиля и развитии пожароопасной ситуации, требующей организации эффективного тушения пожара. В существующих

руководствах пользователя отсутствуют сведения о типе, длительности и количестве огнетушащего вещества для обеспечения локализации и ликвидации горения аккумуляторного блока¹.

¹ Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles // Safety Report NTSB/SR-20/01 / National Transportation Safety Board. Washington, DC. 2020. 69 p. URL: <https://www.nts.gov>

Какие способы и средства пожаротушения применяются на практике для тушения электромобилей и какие из них считаются наиболее эффективными?

ОТВЕТ

Актуальность разработки эффективных способов тушения электромобилей в России с каждым годом стремительно набирает обороты. В 2023 г. наблюдается «взрывной» рост продаж электромобилей², которые в мае составили 880 ед., что в 8 раз превышает объемы продаж в мае 2022 г. (рис. 1). За период январь–май 2023 г. было продано более 3 тыс. ед.

Значительную часть реализуемых автомобилей (более 18 %) занимает российская марка *Evolute* (в Китае – *Dongfeng*), а также малоизвестные марки из Китая (*BYD*, *Hongqi*, *Zeekr* и др.). В руководствах пользователя на данные электромобили производители рекомендуют в случае возгорания аккумуляторного блока использовать для тушения большое количество воды без конкретных рекомендаций.

Для более детального изучения условий пожара и поиска эффективных способов тушения электромобилей требуется обобщение проведенных исследований в данной области.

Опыт тушения электромобилей в других странах показал [2], что вода является наиболее доступным и эффективным средством. При стандартной подаче воды с помощью ручных стволов [3, 4] был выявлен ряд проблем³:

- для тушения аккумуляторного блока электромобиля требуется от 5–10 тонн (до 10 м³) воды с привлечением большого числа пожарной техники при отсутствии вблизи пожарных гидрантов;

² Информация аналитического агентства «Автостат». URL: <https://www.autostat.ru/news/54833/> (дата обращения: 05.06.2022 г.).

³ Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results // Final Report. Fire Protection Research Foundation. 2013. 207 p. URL: <https://www.nfpa.org>

- в среднем длительность тушения составляет 7 ч (с подачи воды на охлаждение внешней оболочки аккумуляторного блока и устранение новых очагов возгорания отдельных аккумуляторных ячеек);
- имеются сложности подачи воды для охлаждения корпуса аккумуляторного блока и непосредственно в очаг пожара, расположенный в нижней части электромобиля;
- присутствует опасность выброса пламени и поражения огнеборца электрическим током при попытке вскрытия корпуса аккумуляторного блока ручным пожарным инструментом;
- до момента подачи воды на тушение требуется выполнить отключение аккумуляторного блока от сети электромобиля;
- после успешной ликвидации пожара и эвакуации электромобиля возникают повторные возгорания аккумуляторного блока в течение суток;
- продукты горения вместе с водой при попадании в почву и воду наносят экологический ущерб (требуется отдельной оценки).

Результаты анализа показывают, что быстрый доступ к очагу возгорания (к ячейке) в аккумуляторном блоке может сократить время подачи и количество огнетушащих веществ за счет охлаждения соседних (не поврежденных) ячеек и локализации горения только в пределах поврежденных ячеек. Достижение данной цели может быть реализовано за счет использования системы пожаротушения (газового или водяного) [5] с прокладкой трубопровода непосредственно над корпусом (или в корпусе) аккумуляторного блока с отводами к каждой секции ячеек для точечной подачи огнетушащего вещества. Так как перевозка и хранение запаса огнетушащего вещества в самом электромобиле требует дополнительного пространства, то можно ограничиться прокладкой сухотруба с внешним выводом, через который может подаваться вода пожарными подразделениями.

Существующие тяговые батареи электромобилей не имеют специально предусмотренных каналов для подачи огнетушащего вещества, поэтому ведется активный

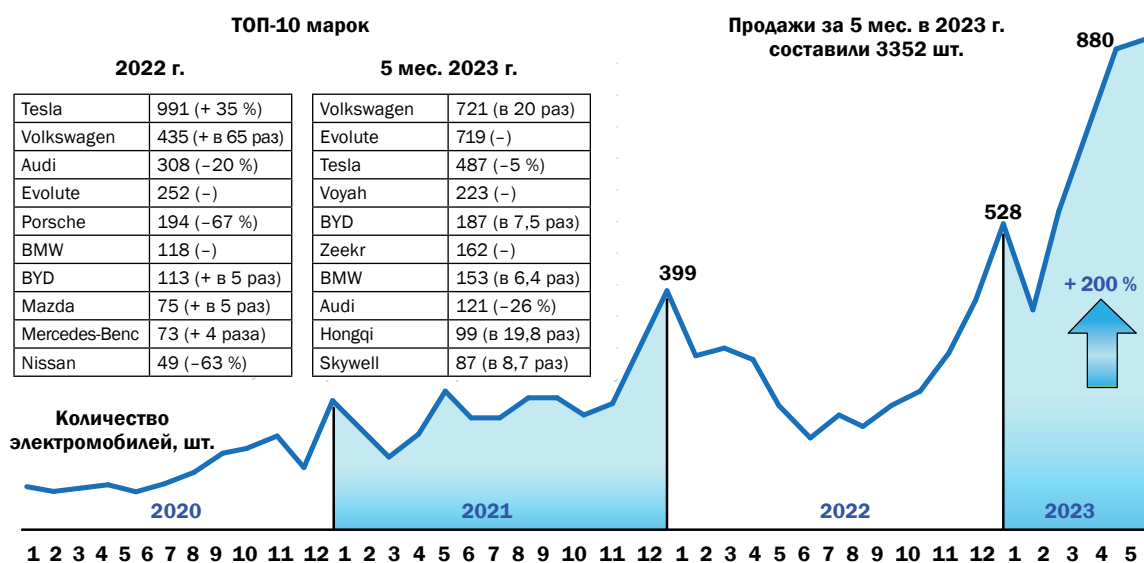
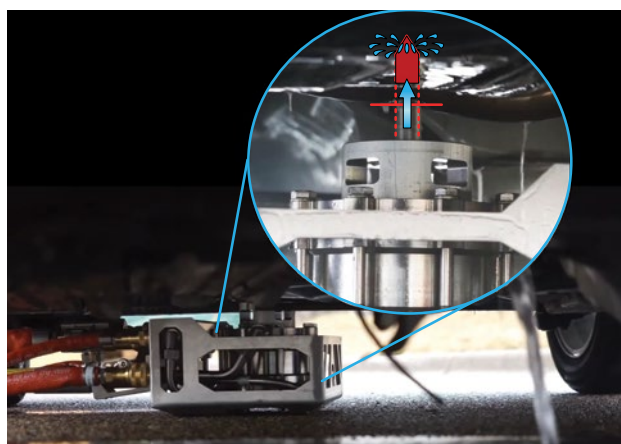


Рис. 1. График роста продаж электромобилей в России по состоянию на май 2023 г.



а



б

Рис. 2. Система пожаротушения электромобилей от компании «Rosenbauer»: а — общий вид установки; б — принцип подачи воды на тушение батареи

поиск и разработка технических решений, обеспечивающих подачу воды во внутреннюю часть оболочки аккумуляторного блока.

Так, известный мировой производитель пожарной техники «Rosenbauer»⁴ разработал эффективную систему пожаротушения (рис. 2), состоящую из блока пожаротушения и блока управления, которые соединяются друг с другом шлангами. Принцип действия системы заключается в подаче воды для тушения и охлаждения аккумуляторного блока через отверстие в днище электромобиля, создаваемое с помощью специального перфорированного ствола-шипа с расходом около 30 л/мин при давлении 6,8 атм. Управление системой осуществляется с безопасного расстояния (около 8 м). За счет подачи воды непосредственно во внутреннее пространство аккумуляторного блока достигается быстрая локализация пожара и снижение выброса ядовитых газов. Время тушения с помощью данной системы составляет 10–60 мин.

Похожий способ тушения электромобилей с помощью «огнетушащего копья» предлагает немецкая фирма «Murer»⁵. Данный способ тушения заключается в подводе воды во внутренние отсеки аккумуляторного блока путем прокола отверстия со стороны салона автомобиля нако-

печником (копьем) за счет удара кувалдой по специальной пластине. Расход воды составляет 40 л/мин. Пожарный ствол выполнен из нержавеющей стали с изолированной ручкой на напряжение до 1 кВ, удлиняемыми насадками (0,5, 0,75 и 1 м) и соединительной однодюймовой головкой (диаметр 25,4 мм) для подключения пожарного рукава (рис. 3). Российским аналогом «огнетушащего копья» может служить ствол-лом или ствол-пробойник.

В натурных испытаниях, проведенных Шведским агентством по чрезвычайным ситуациям (MSB) [6], высокую эффективность показала установка пожаротушения с гидроабразивной резкой «Cobra Ultra High Pressure Lance»⁶ с расходом воды 58 л/мин под давлением 300 атм (рис. 4).

Главным преимуществом режущего ствола являлась непрерывность подачи воды в процессе создания отверстия в корпусе аккумуляторного блока. Это позволило избежать опасных выбросов пламени, имеющих место при пробое корпуса «огнетушащим копьем» или обычным пожарным ломом. Время тушения аккумуляторного блока электромобиля составило 10 мин. Половину этого времени заняла резка водой с абразивом. Общий расход воды на резку и тушение составил 750 литров. Следует отметить, что данная система пожаротушения имеется на вооружении у некоторых российских подразделений пожарной охраны.

⁴ Официальный сайт компании «Rosenbauer». URL: www.rosenbauer.com (дата обращения: 12.06.2022 г.).

⁵ Официальный сайт компании «Murer». URL: www.murer-feuerschutz.de (дата обращения: 15.06.2022 г.).

⁶ Официальный сайт компании «Cold Cut Systems». URL: <https://www.coldcutsystems.com> (дата обращения: 17.06.2022 г.).



а



б

Рис. 3. Система пожаротушения электромобилей от компании «Murer»: а — общий вид установки; б — устройство «огнетушащего копья»



Рис. 4. Система пожаротушения электромобилей «Cobra»

Полноценное применение рассмотренных выше систем пожаротушения не требует привлечения большого числа пожарных подразделений. Пожар в аккумуляторном блоке может быть потушен от одной (двух) пожарных цистерн. Для температурного контроля охлаждения батареи рекомендуется дополнительно использовать тепловизор и отдельный пожарный ствол для охлаждения аккумулятора в период разворачивания системы с последующей подачей воды во внутреннюю часть батареи. Единственным минусом представленных систем в процессе их применения является механическое повреждение корпуса аккумуляторного блока и отдельных, в том числе не подверженных температурному нагреву, ячеек и модулей по причине отсутствия предусмотренных отверстий для подачи огнетушащего вещества. В связи с этим разработка конструкции аккумуляторного блока с заранее предусмотренными местами подачи огнетушащего вещества является целесообразной.

Для предотвращения повторного возгорания батареи пожарные в ряде европейских стран применяют метод погружения всего электромобиля в специальный контейнер (рис. 5), заполненный водой с добавлением поверхностно-активных веществ (смачивателей) [7].

Отдельные производители рекомендуют использовать для ограничения распространения пламени и продуктов горения противопожарное полотно, которым можно покрыть горящий электромобиль, изолировав его от соседних транспортных средств на парковочных местах. Полотно также позволяет ограничить поступление кислорода в очаг пожара и снизить температуру пламени⁷ (рис. 6).

Таким образом, в ряде стран, где электромобили пользуются большой популярностью, разработаны эффективные способы тушения пожара при возгорании аккумуляторного блока. При этом остается неопределенность в последовательности действий пожарно-спасательных служб при возникновении пожаров с участием электромобилей. В действующих нормативных документах большинства стран отсутствуют подробные инструкции для таких случаев. Следовательно, важной составляющей успешного тушения пожара будет являться наличие руководства по тушению пожара, в котором будут представлены сведения о применяемых системах и средствах пожаротушения, технике и другого пожарного оборудования.

⁷ Kathrine A. EV fire blanket test. Centro Zaragoza tests the Bridgehill reusable fire blanket on an electric vehicle. 2023. URL: <https://bridgehill.com/news-insights/ev-fire-blanket-test> (дата обращения: 20.06.2023 г.).



Рис. 5. Погружение электромобиля в контейнер с водой

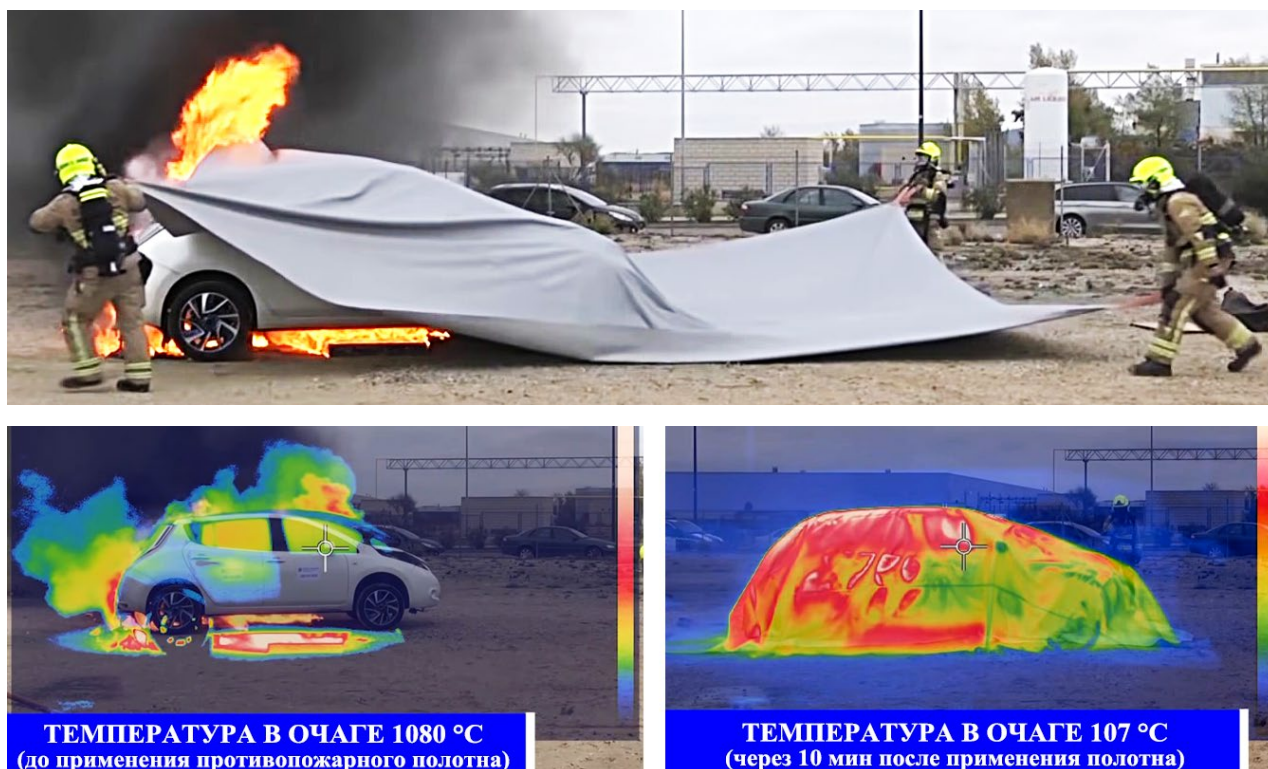


Рис. 6. Применение противопожарного полотна для тушения электромобиля

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 3 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 93–98. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.93-98
2. Lesiak P., Mortka P., Pietrzela D. Methods used to extinguish fires in electric vehicles // Safety & Fire Technology. 2021. Vol. 58. Pp. 38–57. DOI: 10.12845/sft.58.2.2021.3
3. Luo W-T., Zhu S-B., Gong J-H., Zhou Z. Research and development of fire extinguishing technology for power lithium batteries // Procedia Engineering. 2018. Vol. 211. Pp. 531–537. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.045
4. Sun P., Niu H., Bisschop R., Huang X. A review of battery fires in electric vehicles // Fire Technology. 2020. Vol. 56. Issue 4. Pp. 1361–1410. DOI: 10.1007/s10694-019-00944-3
5. Королев А.А., Лоскутов Н.В., Сергиенко А.Н. Электрокары и проблема тушения литий-ионных батарей // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения : мат. Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 22 апреля 2021 г.). СПб., 2021. С. 255–259. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46291482>
6. Demonstration of extinguishing method for lithium ion batteries : Method application at different levels of aggregation — module, sub-battery, electric car pack and vehicle level. MSB. Unit Fire and rescue. 2023. 42 p. URL: [ites/default/files/2023-03/putting%20out%20battery%20fires%20with%20water.pdf](https://www.msb.se/globalassets/2023-03/putting%20out%20battery%20fires%20with%20water.pdf) (дата обращения: 15.06.2022 г.).
7. Kolbasov A.F., Karpukhin K., Dvoenko O.V., Olkhovsky I.A. The main approaches to the system of fire extinguishing and elimination of consequences of accidents of electric vehicles // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 867. Issue 1. P. 012092. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012092

Материал поступил в редакцию 30.06.2023

Received June 30, 2023

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал «ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY» статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т.п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу info@fire-smi.ru.

Статья должна быть ясно и лаконично изложена и подписана всеми авторами (скан страницы с подписями). Основной текст статьи должен содержать в себе четкие, логически взаимосвязанные разделы. Все разделы должны начинаться приведенными ниже заголовками, выделенными полужирным начертанием. Для научной статьи традиционными являются следующие разделы:

- введение;
- материалы и методы (методология) — для научно-эмпирической статьи;
- теоретические основы (теория и расчеты) — для научно-теоретической статьи;
- результаты и их обсуждение;
- заключение (выводы).

Редакция допускает и иную структуру, обусловленную спецификой конкретной статьи (аналитической (обзорной), дискуссионной, рекламной) при условии четкого выделения разделов:

- введение;
- основная (аналитическая) часть;
- заключение (выводы).

Подробную информацию о содержании каждого из обозначенных выше разделов см. на сайте издательства www.fire-smi.ru.

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

2.2. Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть точными и лаконичными и в то же время достаточно информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустима транслитерация с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

2.3.1. Имена, отчества и фамилии всех авторов. Они должны приводиться полностью на русском языке и в транслитерации в соответствии с системой, которая в настоящее время является наиболее распространенной (<http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>).

Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или в ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома,

а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

Пример: *Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Vernadskogo Avenue, 101, Moscow, 119526, Russian Federation).*

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

2.4. Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторское резюме на английском языке в русскоязычном издании является для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- содержательным (должно отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т.е. следовать логике описания результатов в публикации);
- грамотным (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объемом не менее 200–250 слов.

Структура резюме должна повторять структуру статьи и включать четко обозначенные подразделы Введение (Introduction), Цели и задачи (Aims and Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом должны приводиться основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сносок и примечаний;
- для рисунка: подписанной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа вверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D.N. Sokolov, L.P. Vogman, V.A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35-48 (in Russian) (Другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, представившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!