

1-2015

**ПОЖ** Издательство  
**НАУКА**

**ПОЖАРОВЗРЫВО-**

# БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0869-7493

**КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



ОСОБЕННОСТИ ЛИКВИДАЦИИ  
ОТКРЫТОГО ГАЗОВОГО  
ФОНТАНА

# 27–29 мая

# Красноярск 2015



XI специализированный форум-выставка

## АНТИТЕРРОР

современные  
системы  
безопасности



РЕКЛАМА

- Технические средства и системы безопасности
- Инженерно-технические средства физической защиты
- Пожарная безопасность
- Аварийно-спасательное оборудование
- Транспорт
- Экипировка. Индивидуальные средства защиты
- Информационная безопасность
- Безопасность промышленного комплекса

*Ежегодно в выставке принимает участие более 9 000 человек,  
46 % из которых – специалисты отрасли*



**сибирь**  
международный  
выставочно-деловой центр  
имени Карена Мурадяна

Организаторы:



**МВДЦ «СИБИРЬ», ул. Авиаторов, 19**  
**тел.: (391) 22-88-400, 22-88-611 – круглосуточно**  
**сcb@krasfair.ru**  
**www.krasfair.ru**

# СОДЕРЖАНИЕ

# CONTENTS

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

## GENERAL QUESTIONS OF FIRE SAFETY

БАКИРОВ И. К., ХАЛИУЛЛИНА И. Р.  
О сложностях определения пожарного риска  
и угрозы жизни людей от пожара

5

BAKIROV I. K., KHALIULLINA I. R.  
About the difficulties of determining fire risk  
and threat to people life from fire

## ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

## COMBUSTION AND EXPLOSION PROCESSES

ВОЛКОВ Р. С., КУЗНЕЦОВ Г. В.,  
КУРИЛЕНКО Е. Ю., СТРИЖАК П. А.  
Влияние дисперсности капель в пароводяном потоке  
на характеристики их перемещения и испарения  
в пламенной зоне горения

10

VOLKOV R. S., KUZNETSOV G. V.,  
KURILENKO E. Yu., STRIZHAK P. A.  
Droplets dispersion influence in the vapor-and-water flow  
on characteristics of their movement and evaporation  
in the combustion flame zone

## ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

## FIRE-AND-EXPLOSION HAZARD OF SUBSTANCES AND MATERIALS

АЛЕКСЕЕВ С. Г., МАВЛЮТОВА Л. К.,  
КОШЕЛЕВ А. Ю., БАРБИН Н. М.  
Связь показателей пожарной опасности  
с химическим строением. XVII. Дихлоралканы

25

ALEXEEV S. G., MAVLYUTOVA L. K.,  
KOSHELEV A. Yu., BARBIN N. M.  
Correlation of fire hazard characteristics  
with chemical structure. XVII. Dichloroalkanes

БАРБОТКО С. Л., ВОЛЬНЫЙ О. С.,  
КИРИЕНКО О. А., ШУРКОВА Е. Н.  
Особенности испытаний авиационных материалов  
на пожароопасность. Часть 1. Испытания на горючесть.  
Влияние толщины образца на регистрируемые  
характеристики

40

BARBOTKO S. L., VOLNYY O. S.,  
KIRIENKO O. A., SHURKOVA E. N.  
Features the testing of aviation materials  
on fire safety. Part 1. Test on flammability –  
influence of sample thickness  
on registered characteristics

## ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

## FIRE-AND-EXPLOSION SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

БЫКОВ А. И.  
Определение параметра среднего давления газа  
на участке магистрального газопровода

49

BYKOV A. I.  
Parameter definition of the average gas pressure  
in the section of the pipeline

САЙКИН М. С., ТОПОРОВ А. В., ТОПОРОВА Е. А.  
Повышение пожарной безопасности  
химических производств применением  
магнитожидкостных герметизаторов валов мешалок

55

SAYKIN M. S., TOPOROV A. V., TOPOROVA E. A.  
Chemical manufacturing fire safety increasing  
by using of magnetic fluid seals  
of mixers shafts

## ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

## FIRE SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

СЕВРЮКОВ И. Т., ИЛЬИН В. В., КОЗЛОВ В. В.  
Формализация модели системы управления  
безопасностью хранения боеприпасов

61

SEVRYUKOV I. T., ILYIN V. V., KOZLOV V. V.  
Formalization of the model of the safety management  
system of storage of ammunition

ГАВТУНЯК П. И., ГУЛЬЦЕВ В. Е., ЖУРАВЛЕВ В. В.,  
КУСТЫШЕВ А. В., ЧАБАЕВ Л. У.  
Особенности ликвидации открытого газового фонтана  
на глубокой поисково-оценочной скважине

65

GAVTUNYAK P. I., GULTSEV V. E., ZHURAVLEV V. V.,  
KUSTYSHEV A. V., CHABAEV L. U.  
Special aspects of open gas blowout liquidation  
on a deep prospecting and appraisal well

## ПОЖАРНАЯ АВТОМАТИКА

## FIRE AUTOMATIC

КРУПИН М. В., РЯЗАНОВ А. В.  
Экспериментальные исследования  
термомангнитного датчика кислорода

73

KRUPIN M. V., RYAZANOV A. V.  
Experimental studies  
of thermomagnetic oxygen sensor

## СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

## MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

КОРОЛЬЧЕНКО Д. А., ДЕГАЕВ Е. Н., ШАРОВАРНИКОВ А. Ф.  
Огнетушащая эффективность пен из водных растворов  
алкилсульфатов натрия

77

KOROL'CHENKO D. A., DEGAEV E. N., SHAROVARNIKOV A. F.  
Fire extinguishing efficiency of foams based on aqueous  
solution of sodium alkyl sulfates

## ВОПРОС – ОТВЕТ

83

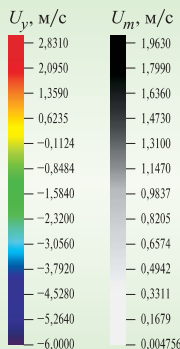
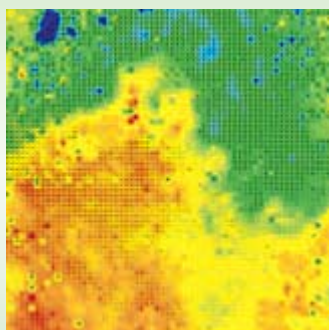
## QUESTION – ANSWER

СМИ зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций – свидетельство ПИ № ФС77-43615 от 18 января 2011 г.

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 ВИНТИ РАН, в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Сведения о журнале ежегодно публикуются в Международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям "Ulrich's Periodicals Directory". Перепечатка материалов журнала "Пожаровзрывобезопасность" только по согласованию с редакцией. При цитировании ссылка 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.



О сложностях определения пожарного риска



Стр. 5

Стр. 10

Влияние дисперсности капель на их испарение



Особенности ликвидации открытого газового фонтана



Исследования термомангнитного датчика кислорода

Стр. 65

Стр. 73

Стр. 77



Пены из водных растворов алкилсульфатов натрия

**Председатель Редакционного совета:**

**Корольченко А. Я.**, д. т. н., профессор, академик МАНЭБ (Россия)

**Зам. председателя Редакционного совета:**

**Мольков В. В.**, д. т. н., профессор (Великобритания)

**Редакционный совет:**

**Баратов А. Н.**, д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ, заслуженный деятель науки РФ (Россия)

**Барбин Н. М.**, д. т. н., профессор (Россия)

**Брушлинский Н. Н.**, д. т. н., профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель науки РФ (Россия)

**Кирюханцев Е. Е.**, к. т. н., профессор (Россия)

**Корольченко Д. А.**, к. т. н., академик МАНЭБ (Россия)

**Лейбман М. Е.**, заслуженный строитель России, генерал-полковник запаса (Россия)

**Меркулов В. А.**, к. т. н. (Россия)

**Мишуев А. В.**, д. т. н., профессор, академик РАЕН (Россия)

**Ройтман В. М.**, д. т. н., профессор, академик НАНПБ и ВАНКБ (Россия)

**Сенин Н. И.**, к. т. н., профессор (Россия)

**Серков Б. Б.**, д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ (Россия)

**Пузач С. В.**, д. т. н., профессор, член-корреспондент НАНПБ (Россия)

**Тамразян А. Г.**, д. т. н., профессор, действительный член ВАНКБ (Россия)

**Теличенко В. И.**, д. т. н., профессор, действительный член РААСН, заслуженный деятель науки РФ (Россия)

**Топольский Н. Г.**, д. т. н., профессор, академик РАЕН и НАНПБ, заслуженный деятель науки РФ (Россия)

**Холщевников В. В.**, д. т. н., профессор, академик и почетный член РАЕН, заслуженный работник высшей школы РФ (Россия)

**Шебеко Ю. Н.**, д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ (Россия)

**Шилдс Т. Дж.**, профессор (Великобритания)

**Редакция:**

Главный редактор **Корольченко А. Я.**

Шеф-редактор **Соколова Н. Н.**

Редактор **Крылова Л. В.**

**Учредитель — ООО "Издательство "ПОЖНАУКА"**

Тел./факс: (495) 228-09-03, 8 (909) 940-01-85.

Адрес редакции: 121108, Россия, г. Москва, ул. Ивана Франко, д. 4, корп. 10 (фактический); 121352, г. Москва, а/я 43 (почтовый).

E-mail: info@fire-smi.ru, mail@firepress.ru, www.fire-smi.ru, www.firepress.ru.

Подписано в печать 15.01.2015. Выход в свет 26.01.2015.

Формат 60x84 1/8. Тираж 5000 экз.

Бумага мелованная матовая. Печать офсетная.

Отпечатано в типографии ООО "КОДА"

(105082, Россия, г. Москва, Спартаковский пер., д. 2, стр.1).



**Founder:**  
"POZHNAUKA" Publishing House, Ltd.

**Editorial Staff:**  
Editor-in-Chief **Korol'chenko A. Ya.**  
Editorial director **Sokolova N. N.**  
Editor **Krylova L. V.**

**Address of Editorial Staff:**  
Ivana Franko St., 4/10, Moscow,  
121108, Russia.  
Post office box 43,  
Moscow, 121352, Russia.  
Phone/Fax: (495) 228-09-03,  
8 (909) 940-01-85  
E-mail: info@fire-smi,  
mail@firepress  
Website: www.fire-smi.ru,  
www.firepress.ru

"Pozharovzryvobezopasnost"  
("Fire and Explosion Safety") is included  
in List of periodical scientific and technical  
publication of the Russian Federation,  
what are recommended for publishing  
the main results of competitors for doctoral  
degree by VAK, in Abstracting Journal  
and VINITI Database RAS, is included  
in Russian Citation Index Database.  
Information about the journal is annually  
published in "Ulrich's Periodicals Directory".  
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 15.01.2015  
Date of publication 26.01.2015  
Format is 60x84 1/8  
Printing is 5 000 copies  
Chalk-overlay mat paper  
Offset printing

**Chairman of Editorial Board:**

**Korol'chenko A. Ya.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of International Academy  
of Ecology and Life Safety (Russia)

**Deputy Chairman of Editorial Board:**

**Molokov V. V.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor (Great Britain)

**Editorial Board:**

**Baratov A. N.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of National Academy  
of Fire Science, Honoured Scientist of the Russian Federation (Russia)

**Barbin N. M.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

**Brushlinskiy N. N.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of Russian Academy  
of Natural Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation (Russia)

**Kiryukhantsev Ye. Ye.,**  
Candidate of Technical Sciences, Professor (Russia)

**Korol'chenko D. A.,**  
Candidate of Technical Sciences, Academician of International Academy  
of Ecology and Life Safety (Russia)

**Leybman M. Ye.,**  
Honoured Builder of the Russian Federation, Retired Colonel General (Russia)

**Merkulov V. A.,**  
Candidate of Technical Sciences (Russia)

**Mishuev A. V.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of Russian Academy  
of Natural Sciences (Russia)

**Roytman V. M.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of National Academy  
of Fire Science, Academician of World Academy of Sciences of Complex  
Safety (Russia)

**Senin N. I.,**  
Candidate of Technical Sciences, Professor (Russia)

**Serkov B. B.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of National Academy  
of Fire Science (Russia)

**Puzach C. V.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of National  
Academy of Fire Science (Russia)

**Tamrazyan A. G.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of World Academy  
of Sciences for Complex Safety (Russia)

**Telichenko V. I.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of Russian Academy  
of Architecture and Construction Sciences, Honoured Scientist  
of the Russian Federation (Russia)

**Topolskiy N. G.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of Russian Academy  
of Natural Sciences, Academician of National Academy of Fire Science,  
Honoured Scientist of the Russian Federation (Russia)

**Kholshchevnikov V. V.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician and Honoured Member  
of Russian Academy of Natural Sciences, Honoured Higher Education Employee  
of the Russian Federation (Russia)

**Shebeko Yu. N.,**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of National Academy  
of Fire Science (Russia)

**Thomas Jim Shields,**  
Professor (Great Britain)

**И. К. БАКИРОВ**, канд. техн. наук, доцент кафедры “Пожарная и промышленная безопасность”, ФГБОУ ВПО “Уфимский государственный нефтяной технический университет” (Россия, Республика Башкортостан, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; e-mail: bakirovirek@bk.ru)

**И. Р. ХАЛИУЛЛИНА**, студентка ФГБОУ ВПО “Уфимский государственный нефтяной технический университет” (Россия, Республика Башкортостан, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1)

УДК 349.6:614.84

## О СЛОЖНОСТЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЖАРНОГО РИСКА И УГРОЗЫ ЖИЗНИ ЛЮДЕЙ ОТ ПОЖАРА

Дан анализ понятия “угроза жизни и здоровью людей” как важного фактора при определении пожарной опасности на объектах и осуществлении пожарного надзора на объектах защиты; обоснована важность значения данного понятия. Предложена классификация требований пожарной безопасности по уровням или степеням опасности. Показана необходимость разработки экспресс-методик оценки пожарного риска для применения их в деятельности по предупреждению пожаров.

**Ключевые слова:** Технический регламент; пожарный риск; пожарная безопасность; угроза жизни и здоровью людей; экспресс-методика оценки пожарного риска.

На сегодняшний день в Российской Федерации утверждены две методики определения расчетных величин пожарных рисков — на производственных объектах и на объектах разной функциональной пожарной опасности [1, 2] (или точнее было бы сказать “на непромышленных объектах”). Однако ни одна из этих методик не распространяется на отдельно стоящие здания складского назначения, здания складского назначения с категорией по пожарной и взрывопожарной опасности “А” и “Б” и жилые здания [3], поэтому не до конца понятно, как рассчитывать для таких объектов пожарный риск.

Теперь о нарушениях, создающих угрозу жизни и здоровью людей. Главный вопрос заключается в том, какие нарушения относятся к нарушениям, создающим угрозу жизни и здоровью людей. Ни в одном из нормативных документов это не определено. Хотя можно, конечно, основываться на одном из комментариев [4] к Техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности [5], описанном ниже.

Необходимо отметить, что словосочетание “угроза жизни или здоровью людей вследствие возможного возникновения пожара” термином не является и его определение в нормативных документах и нормативных правовых актах отсутствует. Угроза жизни или здоровью людей может возникнуть при отсутствии или неисправности систем обеспечения пожарной безопасности объекта защиты (далее — СОПБ) и их элементов, таких как:

- объемно-планировочные решения и средства, обеспечивающие ограничение распространения пожара за пределы очага;

- эвакуационные пути, удовлетворяющие требованиям безопасной эвакуации людей при пожаре;
- системы обнаружения пожара (установки и системы пожарной сигнализации), оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре;
- системы коллективной защиты (в том числе противодымной) и средства индивидуальной защиты людей от воздействия опасных факторов пожара;
- системы противозрывной защиты на технологическом оборудовании;
- первичные средства пожаротушения;
- автоматические установки пожаротушения и др.

Однако, как мы видим, при таком подходе почти любое нарушение в области пожарной безопасности можно отнести к нарушению, создающему угрозу жизни и здоровью людей. Например, на объекте должно быть 100 огнетушителей, а их 99 или 100, но 2 из них неисправны. По здравому смыслу, это нарушение не должно создавать угрозу жизни и здоровью людей, а по логике, предлагаемой российскими нормами, — создает. Или другой пример: в объемно-планировочных решениях предусмотрена одна дверь не противопожарная, и все — этого достаточно, чтобы считать это нарушением, создающим угрозу.

В Уфе, например, недавно был случай, когда арбитражный суд поставил перед экспертом вопрос: представляют ли угрозу для квартиры жилого дома нарушения СОПБ в помещениях общественного назначения, находящихся на 1-м этаже этого же жилого

го дома (определение о назначении экспертизы от 02.08.2013 г. Демского районного суда г. Уфы РБ по ходатайству представителя ответчика ООО “Торг-мастер”).

Оценка угрозы без расчета пожарного риска была бы необоснованной. Можно было бы установить наличие или отсутствие угрозы исходя из определения уровня пожарной опасности, регламентированного в ППБ 01–03 [6], но они сегодня заменены на новый нормативный правовой акт — Правила противопожарного режима в Российской Федерации [7]. Понятия “уровень пожарной опасности” и “уровень обеспечения пожарной безопасности” в новом документе не “фигурируют”, поэтому на сегодняшний день для жилого дома невозможно установить расчетный научный критерий безопасности (уровень пожарной опасности, уровень обеспечения пожарной безопасности, пожарный риск). Экспертное заключение для этого случая содержало вывод об отсутствии угрозы, обоснованный на визуальном предположении. Это, несомненно, неправильный подход, и обусловлен он недоработками, имеющими место в отечественных нормативных документах.

Можно было бы сказать, что есть же ст. 6 [5], на основании которой можно обеспечить пожарную безопасность объекта без расчета пожарного риска. Да, можно, но для этого, кроме требований технических регламентов, должны быть выполнены все требования нормативных документов в области пожарной безопасности, т. е. невыполнение хотя бы одного из множества требований означает угрозу жизни и здоровью людей. Однако, если применять только вышеназванную ст. 6, у нас получится следующий подход: если требование нормативного документа на объекте не выполнено и пожарный риск нельзя рассчитать из-за отсутствия методики расчета на такой объект, значит на объекте есть угроза жизни и здоровью людей. Разве это нормально, если, допустим, на дверях складского или производственного помещения отсутствует информация о его категории (требование нормативного документа), разве это создает угрозу жизни или здоровью людей в отдельно стоящем здании склада, в котором, кстати, постоянно никто не работает и который находится в противопожарных разрывах с другими зданиями в соответствии с нормами и имеет внутри противопожарные преграды между помещениями? Да нет, конечно. Хотя по теории вероятностей можно доказать и то, что белый — это почти черный цвет, но давайте здраво мыслить и принимать действительное за действительное, а абстрактное за абстрактное.

Или другой случай из нашей судебной практики, который, я уверен, далеко не единственный в нашей стране. Возвращаемся к вышеупомянутому приме-

ру. Магазин находится на 1-м этаже, а квартира — на 4-м этаже 5-этажного жилого дома. Даже если в магазине возникнет сильный пожар, до квартиры на 4-м этаже его опасные факторы не достанут, так как дом кирпичный и горючая отделка фасада отсутствует. В этом случае на безопасность может повлиять только взрыв с большим избыточным давлением, который может повлечь за собой потерю несущей способности здания. Но это уже вопрос не столько пожарной безопасности, сколько общей безопасности здания. И опять мы призываем быть объективными при оценке нарушений требований норм, создающих угрозу жизни и здоровью людей. Нарушения могут быть разными: например, просрочен срок зарядки огнетушителя либо система оповещения в магазине на 1-м этаже не речевая, а звуковая или световая. Ну разве такие нарушения могут представлять опасность для квартиры на 4-м этаже, которая отделена от магазина большим количеством противопожарных преград (перекрытий, стен, квартир. этажей) и находится на расстоянии более 30 м от него (см. рисунок)? Конечно же нет. Однако и доказать это при действующих нормах невозможно, и расчеты мы выполнить тоже не можем, так как существующие в России методики для расчетов пожарного риска в жилых зданиях не распространяются на упомянутые выше объекты, а нормы порой абсурдны. В результате страдают люди, бизнес и т. д.

В нашей системе государственного пожарного надзора за объектами вопрос о наличии угрозы жизни и здоровью людей возникает намного чаще, чем в судебной практике. Выносить решение о временном запрете деятельности объектов инспектор может на основании не любых нарушений, а только тех, которые создают угрозу жизни и здоровью людей. Тогда возникает вопрос, насколько правомерно принятое



Общий вид жилого дома с квартирой, для которой необходимо определить пожарный риск от эксплуатации магазина (стрелкой указано расстояние между окном квартиры и магазином)

решение, а если оно не принято, то почему. Однако наш народ не любит спорить с контролирующими органами государственной власти, так как дело это неблагодарное, поскольку “прав тот, у кого больше прав”. Хотя согласитесь, если порядок вынесения какого-то государственного решения в нормах четко не определен, то это создает базу для коррупции и использования служебного положения.

### Выводы

Чтобы найти ответы на вышепоставленные вопросы, все требования пожарной безопасности пред-

лагается классифицировать исходя из критерия, создают они угрозу жизни и здоровью людей или нет. Вопросы, рассмотренные в статье, показывают, что назрела необходимость в разработке экспресс-методик оценки пожарных рисков, действие которых будет охватывать и объекты, на которые не распространяются существующие методики. Кроме того, расчеты пожарных рисков по современным методикам трудоемки и сложны, а с помощью экспресс-методов можно будет быстро и бесплатно (что немало важно для граждан и бизнеса) производить оценку пожарных рисков в разных ситуациях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : утв. приказом МЧС России от 10.07.2009 г. № 404; зарег. в Минюсте РФ 17.08.2009 г., рег. № 14541; введ. 10.07.2009 г. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
2. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : утв. приказом МЧС России от 30.06.2009 г. № 382; введ. 30.06.2009 г. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
3. О внесении изменений в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденную приказом МЧС России от 30.06.2009 г. № 382 : утв. приказом МЧС РФ от 12.12.2011 г. № 749; зарег. в Минюсте РФ 30.12.2011 г., рег. № 22871; введ. 26.05.2012 г. // Бюл. нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. — 26.03.2012. — № 13.
4. Комментарий к отдельным статьям Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности”. Мониторинг по решению коллегии МЧС России от 18 августа 2010 г. № 5/1 “О совершенствовании деятельности в области подтверждения соответствия продукции требованиям пожарной безопасности”. URL : <http://www.mchs.gov.ru/document/222687> (дата обращения: 22.10.2014 г.).
5. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ; принят Гос. Думой 04.07.2008 г.; одобр. Сов. Федерации 11.07.2008 г. — М. : ФГУ ВНИИПО, 2008.
6. ППБ 01–03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации : утв. приказом МЧС России от 18.06.2003 г. № 313; зарег. в Минюсте РФ 27.06.2003 г., рег. № 4838; введ. 30.06.2003 г. // Российская газета. — 2003. — № 129.
7. Правила противопожарного режима в Российской Федерации : утв. постановлением Правительства РФ от 25.04.2012 г. № 390; введ. 01.09.2012 г. // Российская газета. — 2012. — № 93; Собр. законодательства РФ. — 07.05.2012. — № 19, ст. 2415.

*Материал поступил в редакцию 10 ноября 2014 г.*

English

## ABOUT THE DIFFICULTIES OF DETERMINING FIRE RISK AND THREAT TO PEOPLE LIFE FROM FIRE

**BAKIROV I. K.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Fire and Industrial Safety Department, Ufa State Petroleum Technological University (Kosmonavtov St., 1, Ufa, 450062, Republic Bashkortostan, Russian Federation; e-mail address: bakirovirek@bk.ru)

**KHALIULLINA I. R.**, Student of Ufa State Petroleum Technological University (Kosmonavtov St., 1, Ufa, 450062, Republic Bashkortostan, Russian Federation)



## ABSTRACT

With adoption of technical regulations “About requirements of fire safety” in 2009 year a fire risk was installed as the most important indicator of a certain level of object security from fires. Also there were identified new activities in the field of the prevention from fire: expertise of project documentation, fire audit, development of fire safety declaration. These directions were related with calculations of fire risks on the objects. The existing methods of fire risks are difficult and time-consuming. Therefore it is safely possible to call the discussed subject actual.

It was proposed to be classified all fire safety requirements according to requirements, the violation of which creates a threat to the life and health of people and requirements, the violation of which does not pose a threat to the life and health of people. And it is also desirable to develop and approve in the Emercom of Russia express-methods of fire risk assessment, understandable for people and has a direct dependence on the statistics of fires and the main factors of fire danger on objects, and on which technical staff security object could itself to calculate the fire risk, that is not as difficult as now. Maybe some concerned officials that affect such decisions, just don't want to admit to the calculation of fire risks representatives of objects, and therefore so long (over 3 years) “hold on” only two methods of determining the estimated values of fire risk, approved by the Emercom of Russia and approved for use? The complexity of the calculation of fire risks is including access to only a certain range persons, paid computer calculation programs.

It is, after all, the business of the state. And you can call it a monopoly and brake business development and market economy.

**Keywords:** Technical regulations; fire risk; fire safety; threat to the life and health of people; express-method of fire risk assessment.

## REFERENCES

1. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk on production objects*. Order of Emercom of Russia on 10.07.2009 No. 404. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009 (in Russian).
2. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger*. Order of Emercom of Russia on 30.06.2009 No. 382. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009 (in Russian).
3. On amendments to the methodology for determining the estimated values of fire risk in buildings, structures and buildings of various classes of functional fire hazard, approved by the order of Emercom of Russia 30 June 2009 No. 382. The order of Emercom of Russia on 12.12.2011 No. 749. *Bulletin of normative acts of federal executive authorities*, 26.03.2012, no. 13 (in Russian).
4. *Commentary on individual articles of the Federal law dated 22 July 2008 No. 123-FL “Technical regulations on fire safety requirements”*. Monitoring by the decision of the Collegium of the Emercom of Russia on 18 August 2010 No. 5/1. On improving the activities in the field of conformity of product to requirements of fire safety”. Available at: <http://www.mchs.gov.ru/document/222687> (Accessed 22 October 2014).
5. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law on 22.07.2008 No. 123. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2008 (in Russian).
6. PPB 01–03. Fire safety regulations in the Russian Federation. *Rossiyskaya gazeta — Russian Newspaper*, 2003, no. 129 (in Russian).
7. Rules of the fire prevention regime in the Russian Federation. *Rossiyskaya gazeta — Russian Newspaper*, 2012, no. 93 (in Russian).

**Ю.И.ГОРБАНЬ**

**ПОЖАРНЫЕ РОБОТЫ И СТВОЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
В ПОЖАРНОЙ АВТОМАТИКЕ И ПОЖАРНОЙ ОХРАНЕ**

М.: Познака, 2013 г. - 352 с.

- ♦ Для специалистов в области пожарной автоматики и пожарной охраны.
- ♦ В книге представлены новые технологии пожаротушения с применением пожарных роботов, выполненных на базе современной ствольной пожарной техники. Показано, как создавались пожарные роботы в России, как совершенствовалась их конструкция, как они применялись в техногенных катастрофах и как они защищают объекты различного назначения.
- ♦ Рассмотрены основные понятия по гидравлике в пожарном деле и баллистике струй, а также по огнеопасным материалам и огнетушащим веществам, применяемым в ствольной технике.
- ♦ Дана подробная информация по применению роботизированных установок пожаротушения и пожарных стволов для защиты пожароопасных объектов, включая сведения, необходимые для проектировщиков и конструкторов.
- ♦ В 2014 г. книга удостоена премии Национальной академии наук пожарной безопасности в номинации "Монография".



РЕКЛАМА

**СОДЕРЖАНИЕ:**

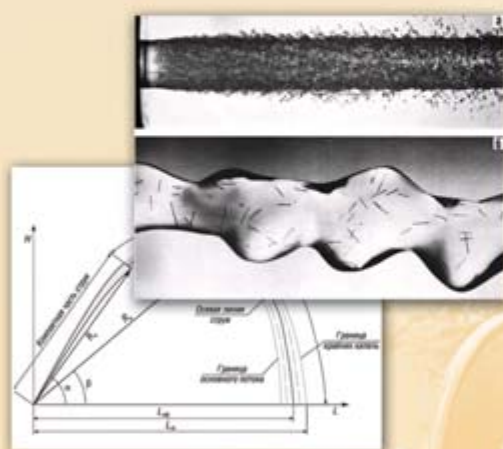
- Часть 1. От первого пожарного робота до Завода пожарных роботов
- Часть 2. Гидравлика в пожарном деле
- Часть 3. Баллистика струй
- Часть 4. «Jet Fog» - летающие и распыленные огнетушащие вещества
- Часть 5. Пожароопасность и пожаробезопасность в расчетах пожарной автоматики
- Часть 6. Ручные пожарные стволы
- Часть 7. Пожарные лафетные стволы
- Часть 8. Пожарная робототехника
- Часть 9. Защита объектов лафетными стволами
- Часть 10. Защита объектов с применением роботизированных пожарных комплексов

**ПО ВОПРОСАМ ПРИОБРЕТЕНИЯ КНИГИ ОБРАЩАЙТЕСЬ:**

ЗАО „Инженерный центр пожарной робототехники “ЭФЭР”  
185031, г.Петрозаводск, ул.Заводская, д.4  
Тел./факс: (8142) 57-11-27, 77-49-23  
e-mail: office@firerobots.ru, http://www.firerobots.ru

Представительство ЗАО „Инженерный центр „ЭФЭР” в г. Москве:  
143956, Московская обл., г.Балашиха, мкр.Никольско-Архангельский,  
Разинское ш., д.5, бизнес-центр “Вешняки”, офис 204  
Т./ф.: +7(498) 665-75-35, моб.т. +7(916) 652-70-78

ООО „Издательство „Познака”  
Тел: (495) 228-09-03  
e-mail: mail@firepress.ru, http://www.firepress.ru



**Р. С. ВОЛКОВ**, младший научный сотрудник кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: romanvolkov@tpu.ru)

**Г. В. КУЗНЕЦОВ**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической и промышленной теплотехники, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: elf@tpu.ru)

**Е. Ю. КУРИЛЕНКО**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры строительной механики, Тюменский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2; e-mail: ksmeh@tgasu.ru)

**П. А. СТРИЖАК**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: pavelspa@tpu.ru)

УДК 536.4

## ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ КАПЕЛЬ В ПАРОВОДЯНОМ ПОТОКЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ В ПЛАМЕННОЙ ЗОНЕ ГОРЕНИЯ

Проведено экспериментальное исследование макроскопических закономерностей влияния дисперсности капель жидкости (характеризуемой относительной концентрацией, размерами и расстояниями между ними) в пароводяном потоке на параметры их перемещения и испарения в пламенной зоне горения. Установлены характерные режимы коагуляции капель при движении через высокотемпературную пламенную зону. Выполнен анализ результатов экспериментов с использованием численного моделирования процессов тепломассопереноса и фазовых превращений. Определено влияние размеров, скоростей движения и дисперсности капель в парожидкостном потоке на температуру и концентрацию продуктов сгорания. Выделены специфические особенности движения капель воды в парожидкостном потоке через высокотемпературную газовую среду.

**Ключевые слова:** водяной пар; вода; капли; пароводяной поток; пламя; испарение; температура и концентрация продуктов сгорания.

### Введение

Во многих современных технологиях пожаротушения, особенно опирающихся на применение капельных жидкостных потоков (например [1–8]), основное внимание уделяется, как правило, оптимальному выбору размеров капель и компонентов тушащего состава. Это, в первую очередь, обусловлено определяющим влиянием данных факторов на характеристики эндотермических фазовых превращений в зоне горения.

Теоретические [9–14] и экспериментальные [15–18] исследования позволили сформулировать основные положения теории тепломассопереноса и фазовых превращений при движении капель жидкостей (в том числе существенно неоднородного состава) через высокотемпературные газовые среды, соответствующие типичным пожарам. Установлены характерные масштабы влияния размеров, скоростей движения и состава жидкостей (воды и эмульсий на их

основе) на интегральные характеристики парообразования в зоне пламени [9–18]. Показано, что процессы движения сопровождаются эффектами дробления и коагуляции [18]. Это существенно затрудняет выбор оптимальных (с точки зрения ресурсоэффективности) параметров распыления тушащего жидкостного состава в реальной практике. При этом эффект дробления приводит в основном к интенсификации испарения, а коагуляция оказывает разностороннее влияние [18]. Представляет интерес экспериментальное и теоретическое исследование влияния дисперсности капель в пароводяном потоке на характеристики их перемещения и испарения в пламенной зоне горения с учетом возможных эффектов коагуляции.

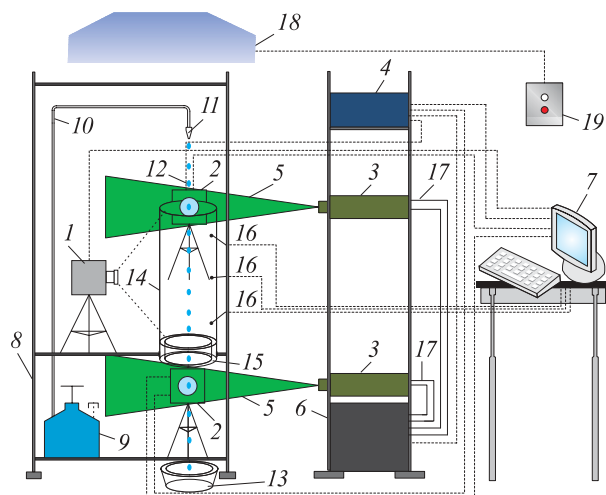
Цель настоящей работы — исследование влияния дисперсности капель в пароводяном потоке на характеристики их перемещения и испарения в пламенной зоне горения.

© Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Куриленко Е. Ю., Стрижак П. А., 2015

### Экспериментальный стенд и методы исследований

Исследования выполнены с применением стенда [15–18], схема которого приведена на рис. 1. Для регистрации результатов использовалась аппаратура: высокоскоростная видеокамера 1 с форматом изображения 1024×1024 пикселей, частотой кадров до  $10^5$  в секунду; кросскорреляционная видеокамера 2 с форматом изображения 2048×2048 пикселей, частотой кадров 1,5 Гц, минимальной задержкой между кадрами 5 мкс; двойной импульсный твердотельный лазер 3 с длиной волны 532 нм, минимальной энергией в импульсе 70 мДж, максимальной длительностью импульса 12 нс, частотой повторений 15 Гц; синхронизирующий процессор 4 с максимальной дискретизацией сигналов 10 нс.

По аналогии с экспериментами, описанными в [15–18], применялся полый цилиндрический канал 14 (высота 1 м, внутренний и внешний диаметры 0,3 и 0,306 м) из огнеупорного жаростойкого стекла для регистрации исследуемых процессов в условиях интенсивных фазовых превращений. В основании канала 14 устанавливался другой полый цилиндр 15 (высота 0,1 м, внутренний и внешний диаметры 0,26 и 0,3 м), в межстеночное пространство которого заливали керосин (около 250 мл) и зажигали его перед проведением опытов. С помощью нагнетательной



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда: 1 — высокоскоростная видеокамера; 2 — кросскорреляционная видеокамера; 3 — двойной твердотельный импульсный лазер; 4 — синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 5 — световой “нож”; 6 — генератор лазерного излучения; 7 — ПК; 8 — штатив; 9 — емкость с рабочей жидкостью; 10 — канал подачи рабочей жидкости; 11 — дозатор-распылитель; 12 — капли рабочей жидкости; 13 — уловитель; 14 — цилиндрический канал из жаростойкого светопрозрачного материала; 15 — полый цилиндр с горючей жидкостью во внутреннем пространстве; 16 — термопары; 17 — канал движения охлаждающей жидкости лазера; 18 — нагнетательная система вентиляции; 19 — пульт включения/отключения нагнетательной системы вентиляции

системы вентиляции 18 в канале 14 изменялась скорость движения продуктов сгорания керосина в диапазоне  $0,1 < U_g < 2,5$  м/с (где  $U_g$  — скорость газов). Температура газов в канале 14, контролируемая хромель-алюмелевыми термопарами 16 (диапазон измеряемых температур 273–1373 К, погрешность измерения  $\pm 3,3$  К), измерялась в трех точках по высоте канала (0,15; 0,50 и 0,85 м на оси его симметрии) и составляла  $(1070 \pm 30)$  К. Для генерации капель жидкости использовался распылитель 11. Контролировались следующие параметры капель: относительная объемная концентрация — объем капель жидкости на единицу объема газа ( $\gamma_m = 0,001 \div 0,0012$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), размер (радиус) ( $0,05 < R_m < 2,5$  мм) и скорость ( $0,5 < U_m < 5$  м/с). Объемная концентрация капель жидкости в газовой среде выбиралась исходя из ограничений (по минимальному числу “трассеров” в регистрационных областях видеок кадров) оптических методов Particle Image Velocimetry (PIV) [19–21] и Interferometric Particle Imaging (IPI) [22–24]. В качестве “трассеров” использовались частицы нанопорошка диоксида титана, которые в количестве 0,5 % по массе вводились в воду для повышения контрастности видеogramм. При обработке результатов экспериментов [15] установлено, что ввод “трассирующих” частиц диоксида титана в такой концентрации несущественно влияет на характеристики испарения и движения капель воды в высокотемпературной газовой среде.

При проведении экспериментов отслеживалось перемещение капель в зоне пламени с определением их размеров. Радиус  $R_m$  принят в качестве характерного размера капель. При  $R_m \leq 0,3$  мм и конфигурациях, несущественно отличающихся от сферической (амплитуды деформации менее 10 % от радиуса сферы), для определения характерных размеров капель использовался метод IPI [22–24] с алгоритмами из [16–18]. Капли жидкости в регистрационной области многократно освещались “ножом” 5. При этом наблюдалась интерференция между отраженным и преломленным водой светом. Выполнялась процедура видеофиксации изображений с помощью кросскорреляционной камеры 2, и по числу наблюдаемых на видеogramмах интерференционных полос [22–24] определялись размеры капель. При  $R_m > 0,3$  мм и существенном отклонении конфигурации капель от сферы (вследствие ограничений метода IPI [22–24]) для фиксации изображений использовалась высокоскоростная камера 1. По изображениям определялись максимальные диаметры капель в пикселях (от 6 до 10 значений в зависимости от конфигурации), которые затем усреднялись (по числу измерений). С учетом масштабного коэффициента  $S$  (изменяющегося в диапазоне 10–50 мкм/пикс в зависимости от размеров регист-

рациональных областей) рассчитывались радиусы  $R_m$  (процедура аналогична применяемой в экспериментальных исследованиях [15–18]).

Скорости движения капель жидкости и газов определялись по перемещениям “трассеров” с применением метода PIV [19–21] и алгоритмов [15–18]. Измерение мгновенного поля скорости в заданном сечении полидисперсного газопарокапельного потока основано на измерении расстояния, преодолеваемого “трассерами”, находящимися в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени (принимаемый в соответствии с методиками [19–21] равным 100 мкс). Применялся кросскорреляционный алгоритм, предполагающий использование метода быстрого преобразования Фурье с добавлением условий выполнения корреляционной теоремы [19–21].

Для контроля скорости газов  $U_g$  перед вводом капель жидкости в канал 14 в него вдувались частицы нанопорошка диоксида титана (от 5000 до 7000 частиц в соответствии с требованием по минимальному числу “трассеров” в расчетных областях видеокадров [19–21]). Затем регистрировались поля скоростей “трассеров” и распределения последних по радиусу канала 14. При достижении условий относительно равномерного движения газов с заданной скоростью (отклонения значений скоростей “трассеров” по радиусу не более 7 %) в канал вводились капли жидкости. Скорость каждой капли  $U_m$  определялась по скоростям содержащихся в ней “трассирующих” частиц (малые перемещения “трассеров” в капле незначительно влияют на скорость ее движения [15–18]).

Систематические погрешности определения размеров капель и скоростей “трассеров” составили соответственно 1,5 и 2,1 %. Максимальные случайные погрешности определения этих параметров (при выполнении от 7 до 10 экспериментов в идентичных условиях) достигали 4,2 %.

При проведении экспериментов в отличие от опытов, описанных в [17, 18], основное внимание уделялось анализу изменения расстояний между каплями  $L_n$  в пламени, их размеров и траекторий движения, а также возможных режимов коагуляции. Для анализа результатов экспериментов использовалась модель тепломассопереноса, которая в отличие от постановок, принятых в [9–14], учитывает все основные процессы и факторы, характерные для системы *капля воды – высокотемпературные газы*.

### Модель тепломассопереноса и методы решения

Применялись три типичные системы *капли жидкости – высокотемпературные газы*, отличающиеся взаимным расположением капель (рис. 2). Предполагалось, что капли воды движутся с безразмерной скоростью  $V_d$  на некотором начальном расстоянии друг от друга  $L_n$  под действием сил тяжести и сопротивления в области, заполненной высокотемпературными газами (соответствующими типичным продуктам сгорания). Принято, что начальная температура капель  $\Theta_0$  существенно ниже температуры газов  $\Theta_f$ . Считалось, что капли прогреваются за счет теплопроводности. На границе *жидкость – газ* происходит их испарение. Пары воды вдуваются в высокотемпературную газовую среду и смешиваются с нагретыми газами. Вследствие эндотермического фазового превращения и вдува паров температура парогазовой смеси в непосредственной близости от капель снижается. В условиях интенсивного парообразования размеры капель уменьшаются (соответственно, меняется и расстояние между ними относительно начального значения  $L_n$ ). Через некоторое время происходит полное испарение капель, движущихся первыми в совокупности (назовем их каплями-лидерами) (см. рис. 2). Аналогично испаряются и все последующие капли.

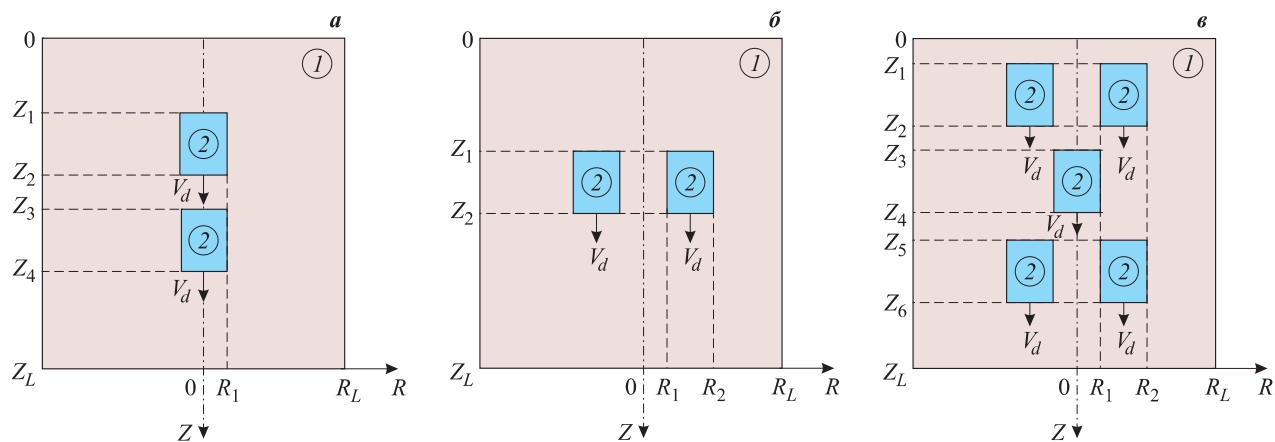


Рис. 2. Постановка задачи тепломассопереноса для двух капель, движущихся последовательно (а); двух капель, движущихся параллельно (б); пяти капель (в): 1 — высокотемпературная газовая смесь; 2 — капли воды

Математическая модель (в постановке в безразмерных переменных для уменьшения вычислительных ресурсов), соответствующая принятой постановке задачи (см. рис. 2,а) и сформулированная согласно основным положениям [25–27], включает следующую систему нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных ( $0 < \tau < \tau_d$ ):

- $0 < R < R_L, 0 < Z < Z_1, Z_2 < Z < Z_3, Z_4 < Z < Z_L;$   
 $R_1 < R < R_L, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4;$

$$\frac{1}{Fo_1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Z^2},$$

$$\frac{\partial C_w}{\partial \tau} = Gr_3 \left( \frac{\partial^2 C_w}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial C_w}{\partial R} + \frac{\partial^2 C_w}{\partial Z^2} \right),$$

$$C_f + C_w = 1;$$

- $0 < R < R_1, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4;$

$$\frac{1}{Fo_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Z^2},$$

$$Fo_1 = \frac{\lambda_1 t_m}{\rho_1 C_1 z_m^2}, \quad Fo_2 = \frac{\lambda_2 t_m}{\rho_2 C_2 z_m^2}, \quad Gr_3 = \frac{D_3 t_m}{z_m^2},$$

где  $\tau$  — безразмерное время;

$\tau_d$  — безразмерное время полного испарения капель;

$R, Z$  — безразмерные координаты цилиндрической системы;

$\Theta$  — безразмерная температура;

$Fo$  — число Фурье;

$C_f, C_w$  — безразмерные концентрации продуктов сгорания и паров воды;

$Gr$  — безразмерный диффузионный параметр;

$\lambda$  — теплопроводность, Вт/(м·К);

$t_m$  — характерный масштаб по времени, с;

$C$  — теплоемкость, Дж/(кг·К);

$z_m$  — характерный масштаб по координате, м;

$\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$D$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;

индексы: 1 — парогазовая смесь, 2 — капля воды, 3 — пары воды.

Начальные ( $\tau = 0$ ) условия (см. рис. 2,а):

- $\Theta = \Theta_0$  при  $0 < R < R_L, 0 < Z < Z_1, Z_2 < Z < Z_3, Z_4 < Z < Z_L;$   
 $R_1 < R < R_L, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4;$
- $\Theta = \Theta_f, C_f = 1, C_w = 0$  при  $0 < R < R_1, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4.$

Граничные условия (см. рис. 2,а) принимались следующие:

- на границах *жидкость – газ* ( $R = R_1, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4; Z = Z_1, Z = Z_2, Z = Z_3, Z = Z_4, 0 < R < R_1$ ) для уравнения диффузии — краевые условия II рода с учетом вдува паров воды;

- на внешних границах ( $R = 0, R = R_L, 0 < Z < Z_L; Z = 0, Z = Z_L, 0 < R < R_L$ ) для всех уравнений — условие равенства нулю градиентов соответствующих функций.

В отличие от моделей [10–14] для учета влияния вдува паров воды на условия теплообмена на границах *жидкость – газ* в соответствии с заключениями [25–27] для уравнений энергии выставлялись следующие краевые условия:

- $R = R_1, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4;$

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial R} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} - Q_e W_e \frac{z_m}{\Delta T \lambda_2} - \rho_3 C_3 V_e (\Theta_{3s} - \Theta_{2s}) \frac{z_m}{\lambda_2};$$

- $Z = Z_1, Z = Z_2, Z = Z_3, Z = Z_4, 0 < R < R_1;$

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial Z} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial \Theta_1}{\partial Z} - Q_e W_e \frac{z_m}{\Delta T \lambda_2} - \rho_3 C_3 V_e (\Theta_{3s} - \Theta_{2s}) \frac{z_m}{\lambda_2},$$

где  $Q_e$  — тепловой эффект испарения, Дж/кг;

$W_e$  — скорость испарения, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$\Delta T$  — коэффициент для определения безразмерной температуры;

$\Theta_{2s}, \Theta_{3s}$  — безразмерные температуры соответственно жидкости и паров на границе *жидкость – газ*.

Уравнение движения капли в условиях парообразования с учетом действия сил сопротивления и тяжести согласно представлениям [27] имеет следующий вид:

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{3\rho_3}{4\rho_2 2r_d} c_\chi |v_d - v_e| (v_d - v_e) + g,$$

где  $v_d$  — скорость одиночной капли, м/с;  $v_d(0) = v_0;$

$t$  — время, с;

$r_d$  — радиус одиночной капли, м;

$c_\chi$  — безразмерный коэффициент сопротивления;

$v_e$  — скорость оттока паров воды с поверхности капли, м/с;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Безразмерный коэффициент сопротивления  $c_\chi$ , зависящий в общем случае от конфигурации поверхности тела, его положения относительно направления движения обтекающего потока и других факторов, определялся в соответствии с теорией [27]. Так, зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса (Re), характеризующая влияние скорости движения  $v_d$  и размера  $r_d$  капли на силу сопротивления, при аппроксимации корреляционных кривых Шиллера – Неймана и Озеена для возможного диапазона изменения Re в рассматриваемых системах имеет вид [27]:

$$c_\chi = 24,3Re^{-0,635}.$$

Для определения коэффициента сопротивления с учетом несферичности капли, ее нестационарного движения, испарения и конвективных течений внутри обтекаемого газовым потоком тела использовалось следующее выражение [27]:

$$c_{\chi} = 24,3k_g \frac{1}{B+1} \frac{1+2\mu_2/(3\mu_3)}{1+\mu_2/\mu_3} \times (A+1)^{1,2 \pm 0,03} \text{Re}^{-0,635},$$

где  $k_g$  — безразмерный геометрический коэффициент, учитывающий отклонение формы обтекаемого тела от сферы [27];  
 $B$  — число переноса Сполдинга;  
 $\mu$  — динамическая вязкость, кг/(м·с);  
 $A$  — безразмерный комплекс, характеризующий относительное ускорение капель.

Соотношение  $1/(B+1)$  представляет собой коэффициент, описывающий влияние процесса испарения капли на силу сопротивления:

$$B = \frac{C_2(T_{3s} - T_{2s})}{Q_e + q_i/W_e},$$

где  $T_{2s}, T_{3s}$  — размерные аналоги  $\Theta_{2s}, \Theta_{3s}$ , К;  
 $q_i$  — поток тепла к капле, Вт/м<sup>2</sup> [27].

Выражение  $\frac{1+2\mu_2/(3\mu_3)}{1+\mu_2/\mu_3}$  представляет собой коэффициент, учитывающий возможные конвективные течения внутри капли [27].

Выражение  $(A+1)^{1,2 \pm 0,03}$  характеризует ускоренное движение тела [27]:

$$A = \frac{d}{v_d^2} \frac{dv_d}{dt}.$$

Для вычисления массовой скорости испарения воды использовалось выражение [27]:

$$W_e = \frac{\beta}{1 - k_{\beta}\beta} \frac{P^n - P}{\sqrt{2\pi R_t T_e / M}},$$

где  $\beta$  — безразмерный коэффициент испарения (конденсации);  
 $k_{\beta}$  — безразмерный коэффициент скорости испарения;  
 $P^n$  — давление насыщенных паров воды, Н/м<sup>2</sup>;  
 $P$  — давление паров воды вблизи границы испарения, Н/м<sup>2</sup>;  
 $R_t$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  
 $T_e$  — температура поверхности капли, К;  
 $M$  — молярная масса, кг/кмоль.

Принято считать [28], что достоверной экспериментальной информации о коэффициентах испарения  $\beta$  и  $k_{\beta}$  опубликовано очень мало, а теоретические методы их определения находятся на начальной стадии своего развития. Поэтому значения этих

коэффициентов принимались  $\beta = 0,1$  и  $k_{\beta} = 0,4$  в соответствии с условиями протекания рассматриваемых процессов исходя из физических представлений авторов [28].

Для вычисления давления паров воды использовалось уравнение Клапейрона – Менделеева [29].

Толщина испарившегося слоя жидкости  $l_e$  (м), характеризующая убыль массы капли в единицу времени, рассчитывалась аналогично [9–14] по формуле

$$l_e = W_e t / \rho_2.$$

Можно отметить, что зависимость  $l_e = f(t)$  существенно нелинейна. Это обусловлено тем, что массовая скорость испарения  $W_e$  изменяется во времени нелинейно [28, 30, 31].

Для перехода к безразмерным переменным в качестве масштабных величин по аналогии с [12–14] использовались: усредненный характерный размер капли  $z_m = 1$  мм, масштаб времени  $t_m = 1$  с, температура  $T_m = 1000$  К и скорость  $v_m = 1$  м/с. Теплофизические характеристики капель и газов, а также алгоритмы численного решения задачи теплопереноса и методы аналогичны используемым в постановках [12–14].

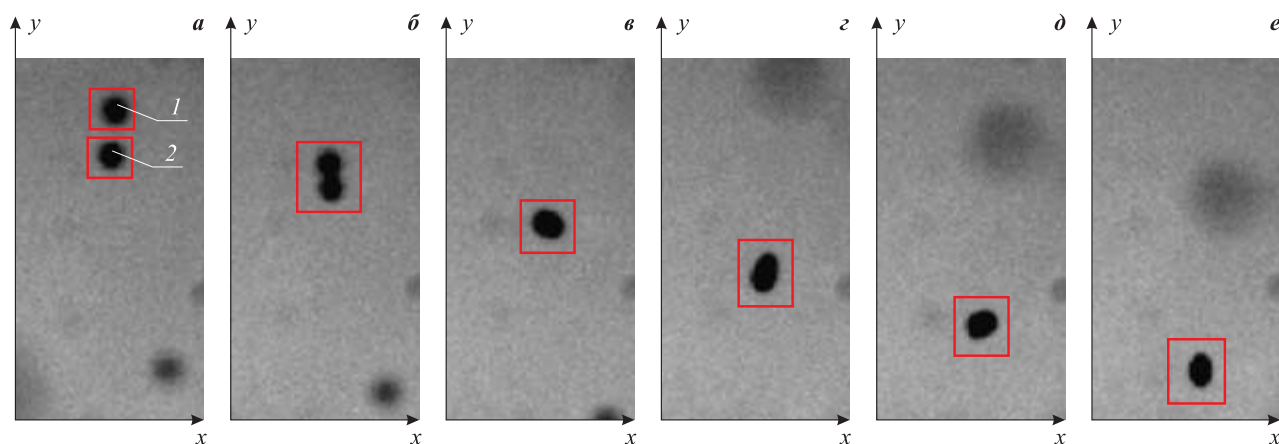
Методика оценки достоверности результатов выполненных теоретических исследований, основанная на проверке консервативности применяемой разностной схемы, аналогична используемым в исследованиях [32–35].

### Результаты и их обсуждение

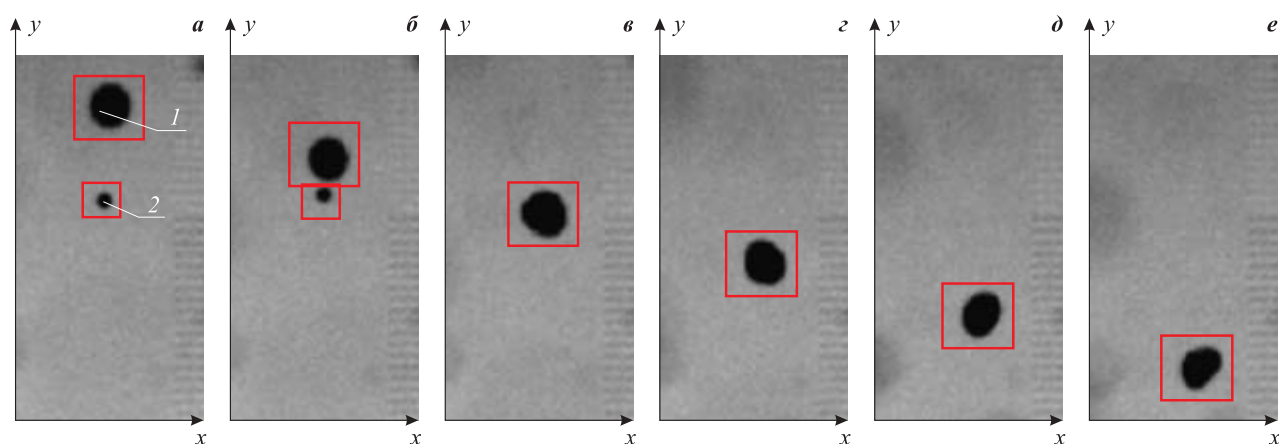
В результате анализа видеogramм экспериментов установлено несколько режимов коагуляции капль при движении их через пламя. Так, в частности, при слежении за изменением расстояний между каплями и температуры парогazовой смеси в следе капль выявлено, что коагуляция последних может реализовываться в трех режимах:

- 1) движущиеся в следе капль догоняют идущие впереди (рис. 3);
- 2) капль изменяют направление своего движения на противоположное вследствие сил сопротивления газогового потока и коагулируют с идущими следом каплями (рис. 4);
- 3) капль вследствие реализации фазовых превращений коагулируют с движущимися на некотором расстоянии от них каплями (рис. 5).

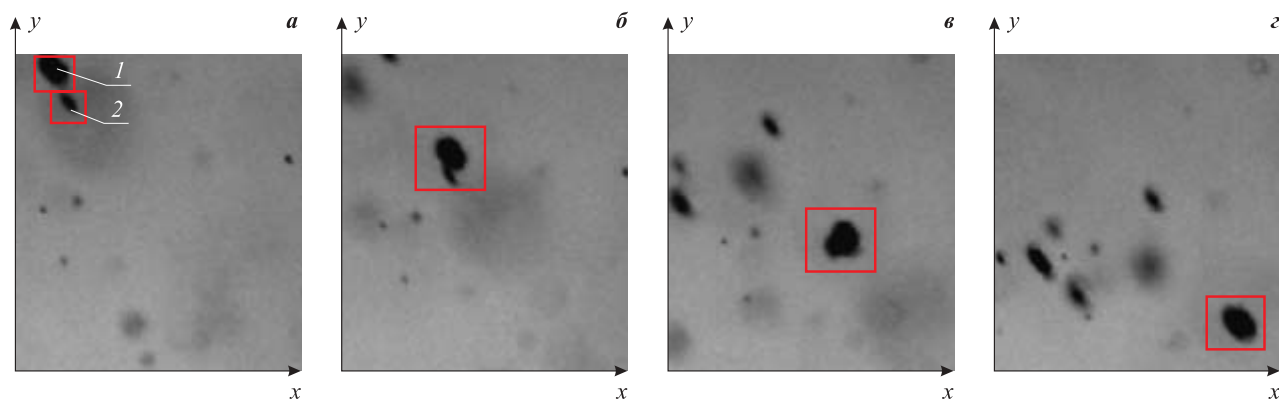
Причины реализации выявленных режимов коагуляции установлены с использованием видеogramм экспериментов и численного моделирования (постановки на рис. 2). Так, например, первый режим обусловлен существенным замедлением движения идущих первыми капль при парообразовании и созданием условий (за счет снижения температуры в следе) для значительно менее интенсивного испарения каждой последующей капль. Идущие пер-



**Рис. 3.** Последовательные кадры видеogramм при реализации первого режима коагуляции: *a* —  $t = 0$ ; *б* —  $t = 0,15$  мс; *в* —  $t = 0,3$  мс; *г* —  $t = 0,45$  мс; *д* —  $t = 0,6$  мс; *е* —  $t = 0,75$  мс



**Рис. 4.** Последовательные кадры видеogramм при реализации второго режима коагуляции: *a* —  $t = 0$ ; *б* —  $t = 0,1$  мс; *в* —  $t = 0,2$  мс; *г* —  $t = 0,3$  мс; *д* —  $t = 0,4$  мс; *е* —  $t = 0,5$  мс



**Рис. 5.** Последовательные кадры видеogramм при реализации третьего режима коагуляции: *a* —  $t = 0$ ; *б* —  $t = 0,125$  мс; *в* —  $t = 0,25$  мс; *г* —  $t = 0,375$  мс

выми капли практически останавливаются за счет встречного движения восходящих продуктов сгорания и интенсивного уноса массы при парообразовании, а движение следующих за ними капель ускоряется (вследствие уменьшения скорости фазового перехода и температуры продуктов сгорания во фронте движения). Через определенный промежу-

ток времени эти капли догоняют значительно испарившиеся капли-лидеры и сливаются с ними, продолжая движение уже в виде “объединенных” капель. Этот процесс может продолжаться до полного испарения всех капель распыленной жидкости.

Проведенные эксперименты показали, что доля испарившихся капель в зависимости от их харак-



терных размеров (от 0,05 мм до 2,5 мм) существенно различается. В частности, установлено, что при  $R_m \leq 0,17$  мм испаряется практически 100 % капель в канале длиной 1 м, при  $0,17 < R_m \leq 0,3$  мм — около 70 %, при  $R_m \approx 0,5$  мм — до 20 %, а при  $R_m \rightarrow 2,5$  мм — не более 8 %. Как следствие, существенно уменьшается относительная концентрация капель в потоке высокотемпературных газов  $\alpha_m$ :  $\alpha_m \rightarrow 0$  — для малых капель ( $R_m \leq 0,2$  мм);  $\alpha_m \approx 0,7$  — для средних ( $0,2 < R_m \leq 0,4$  мм);  $\alpha_m = 0,3$  — для крупных (по начальным размерам) капель. Изменение значений  $\alpha_m$  и  $R_m$  в процессе движения капель через высокотемпературные газы характеризует существенно нелинейный и нестационарный процесс. Очевидно, это обусловлено зависимостью скорости парообразования  $W_e$  от температуры поверхности  $T_e$  каждой капли жидкости.

На рис. 6 приведены значения  $W_e$ , установленные по результатам обработки экспериментальных данных и проведенного численного моделирования. Видно, что они существенно нелинейно (в несколько раз) увеличиваются при росте температуры поверхности капли. При этом можно отметить удовлетворительное отличие теоретических и экспериментальных значений  $W_e$  (в том числе при относительно низких температурах [27]). В частности, по результатам измерений массы и размеров капель на входе и выходе из высокотемпературного канала установлено, что средняя скорость испарения воды составляет около 0,241–0,278 кг/(м<sup>2</sup>·с). Численные исследования показали, что температура поверхностей капель  $T_e$  при  $T_f \approx 1100$  К может возрасти от 350 до 370 К с увеличением времени перемещения в газовой среде, причем этот процесс носит нелинейный характер. При таких значениях  $T_e$  скорость испарения изменяется от 0,136 до 0,261 кг/(м<sup>2</sup>·с).

В результате численного моделирования установлен нелинейный характер прогрева капель в процессе движения через высокотемпературную смесь. Так, например, на рис. 7 представлено распределение температур в капле в разные моменты времени при внешней температуре газов около 1100 К. Из графиков видно, что температура капли (в том числе ее поверхности  $T_e$ ) вследствие ее прогрева с ростом времени значительно повышается. Это приводит к интенсификации фазовых превращений и, как показали численные исследования, к существенному изменению скоростей движения капель. В частности, выявлено, что с ростом массы вдуваемых паров размер буферного слоя вокруг капли значительно увеличивается. Как следствие, наблюдается рост сил сопротивления, и движение капель-лидеров замедляется, а идущие следом капли догоняют их и коагулируют с ними.

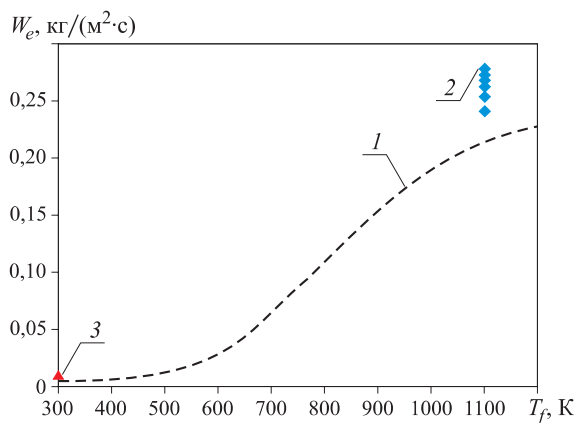


Рис. 6. Зависимость скорости испарения капель воды от температур их поверхности: 1, 2 — теоретические и экспериментальные значения; 3 — экспериментальные значения из [27]

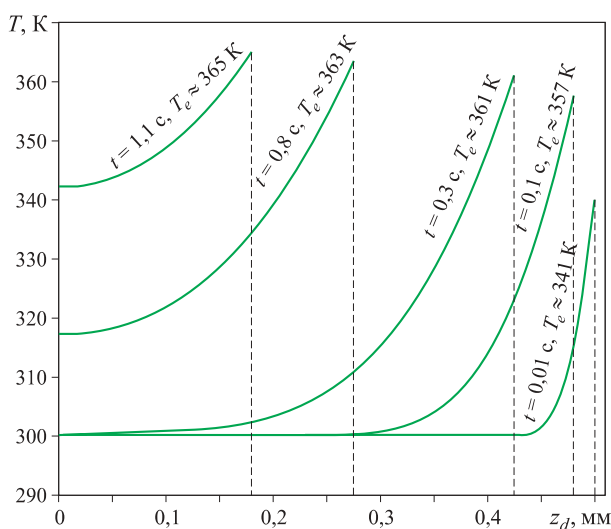
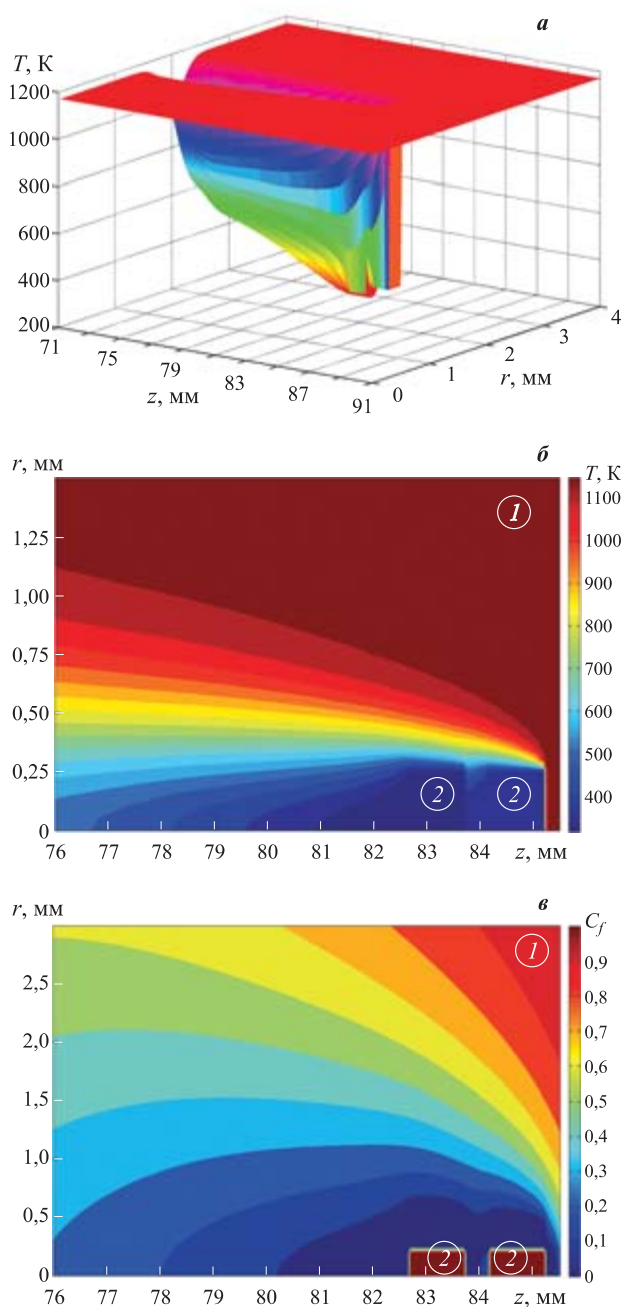


Рис. 7. Распределение температуры в капле воды при начальных размерах  $r_d = 0,25$  мм,  $z_d = 1$  мм и температуре газов  $T_f = 1100$  К в разные моменты времени

Эти процессы приводят к значительным изменениям концентрации и температуры продуктов сгорания между каплями в водяном потоке. В частности, с использованием разработанных моделей тепломассопереноса (см. рис. 2) установлены типичные изотермы и изолинии концентраций продуктов сгорания в малой окрестности капель (рис. 8).

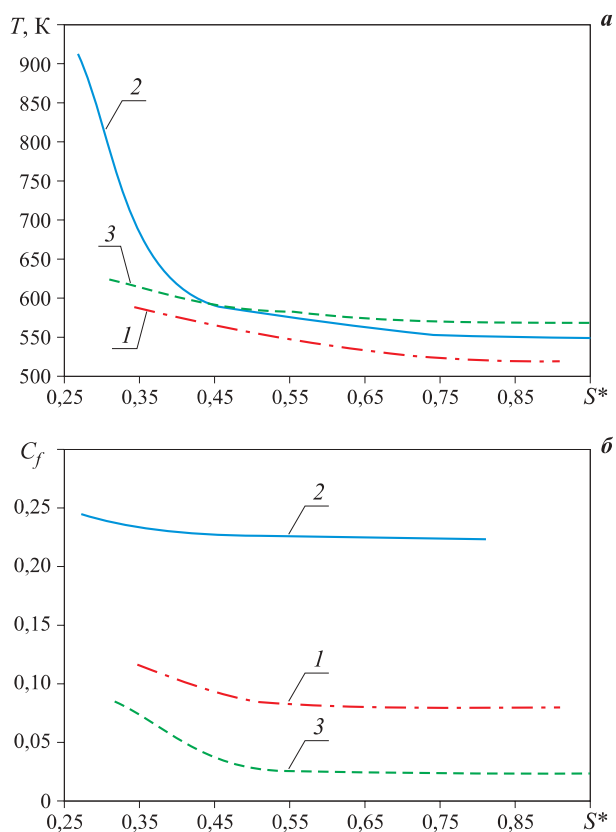
На рис. 9 представлены значения температур  $T_f$  и концентраций  $C_f$  в следе капель при различных расстояниях между ними. Аналогично исследованиям с упрощенной моделью [14] можно выделить расстояния  $L_n$ , при которых значения  $T_f$  и  $C_f$  минимальны. При этом если рассматривать параметр  $S^*$  [14], иллюстрирующий отношение общей начальной площади поверхности испарения совокупности капель  $S_e$  к общей начальной площади поверхности  $S_w$  занимаемого ими объема, то можно отметить соизмеримый эффект как для двух параллельных капель, так и для пяти. Эти результаты позволяют



**Рис. 8.** Температурное поле (а), изотермы (б) и концентрации продуктов сгорания (в) при  $r_d = 0,25$  мм,  $z_d = 1$  мм,  $L_n = 0,5$  мм,  $T_f = 1100$  К: 1 — парогазовая смесь; 2 — капли воды

объяснить реализацию первого режима коагуляции (см. рис. 3).

Второй режим коагуляции (см. рис. 4) реализуется вследствие уноса капель воды формирующимся потоком продуктов сгорания. Так, при численных и экспериментальных исследованиях установлены соотношения начальных скоростей газов, а также скоростей и размеров капель, при которых происходит унос последних и реализация второго режима коагуляции. При  $U_m \approx U_g$  в рассматриваемой области смешения потоков существенно меньшая доля



**Рис. 9.** Зависимость температуры (а) и концентрации (б) продуктов сгорания в следе капле от расстояний между ними для модели: 1 — с двумя последовательно перемещающимися каплями; 2 — с двумя параллельно движущимися каплями; 3 — с пятью каплями

капель жидкости (только при  $R_m < 0,17$  мм) изменяет направление своего движения относительно начального на противоположное. При начальном соотношении  $U_m > U_g$  от 70 до 90 % капель (даже при  $R_m < 0,17$  мм) сохраняют направление движения, соответствующее направлению их ввода в высокотемпературную газовую среду. При этом с ростом размеров  $R_m$  число таких капель нелинейно увеличивается.

В результате обобщения экспериментальных данных с использованием разработанных моделей тепломассопереноса установлен параметр, который можно использовать при численном определении условий уноса капель газами. Так, в рассмотрение введен параметр  $\gamma_f$ , характеризующий соотношение сил сопротивления  $F_a$  и тяжести  $F_m$ , действующих на каплю. Значения  $F_a$  и  $F_m$  вычислялись в соответствии с положениями теории тепломассопереноса и гидродинамики в газокapельных потоках [27].

Исходя из анализа рис. 10, можно сформулировать условие торможения капель в виде  $\gamma_f = 1$ . При  $\gamma_f < 1$  капли сохраняют начальное направление движения, а при  $\gamma_f > 1$  уносятся газовым потоком. Параметр  $\gamma_f$  можно использовать при прогнозировании второго режима коагуляции.

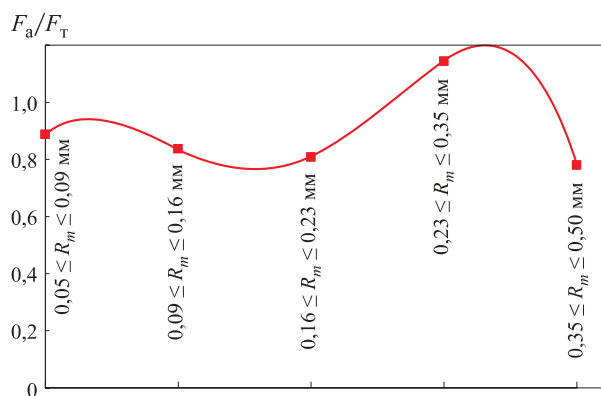


Рис. 10. Соотношение сил сопротивления и тяжести, действующих на капли воды при уносе газами

Третий режим коагуляции (см. рис. 5) реализуется при движении нескольких капель разных размеров на некотором расстоянии друг от друга (условно это движение можно назвать параллельным). На рис. 11 приведены типичные поля скоростей “трассеров”, соответствующих каплям воды и высокотемпературным газам при реализации третьего режима.

В результате численного моделирования установлено, что вследствие испарения капель воды и, соответственно, уменьшения их размеров довольно значительно изменяется давление парогазовой смеси в малой окрестности поверхности капель. Кроме того, при уменьшении размеров капли уменьшаются и характерные размеры их “температурных следов” (областей в следе капель, в которых температура продуктов сгорания снижается до умеренных значений — не более 400 К). Вследствие изменения температуры и давления парогазовой смеси между каплями за счет сил термофореза и турбофореза [27] расстояние между параллельно перемещающимися капля-

ми  $L_n$  уменьшается или возрастает. При повышении скоростей испарения капля параметр  $L_n$  растет, при снижении — уменьшается.

Можно отметить, что третий режим, как правило, реализуется совместно со вторым вследствие существенного изменения скоростей движения капель в потоке высокотемпературных продуктов сгорания. Поэтому идентификация этих двух режимов достаточно сложна и, как показали проведенные эксперименты, возможна только при использовании подходов высокоскоростной “трассерной” визуализации. В то же время объяснение причин их реализации возможно только по результатам численного моделирования с учетом всех основных процессов тепломассопереноса и фазовых превращений.

При анализе режимов коагуляции капель воды в области высокотемпературных газов установлены характерные особенности столкновения капель. Так, например, на рис. 12 приведены типичные видеок кадры с иллюстрацией процесса столкновения двух капель с существенно различающимися размерами. Эксперименты показали, что при “касательном” столкновении двух капель (особенно при различии их характерных размеров в несколько раз) происходит их кратковременное слияние и затем дробление на две капли с размерами, близкими к начальным (см. рис. 12). При “лобовом” столкновении капля происходит их слияние и далее движение продолжает “объединенная” капля. В то же время эксперименты показали, что характеристики процессов столкновения капель существенно изменяются при варьировании размеров и скоростей перемещения капель, а также углов пересечения их траекторий движения. Анализ результатов проведенных экспериментов, а также заключений, данных в [36–39],

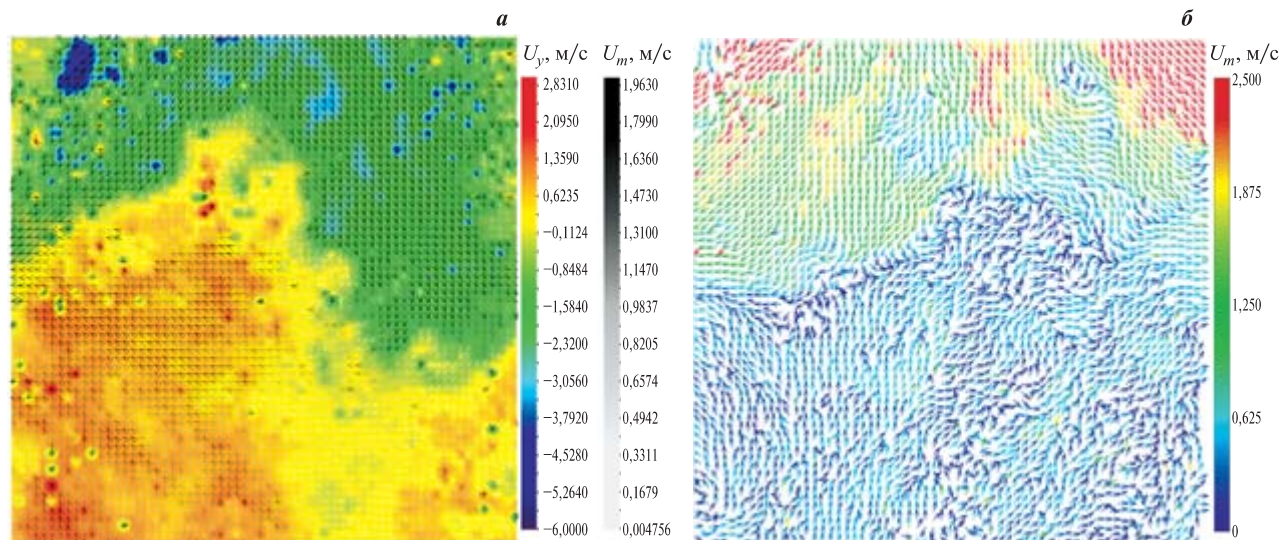
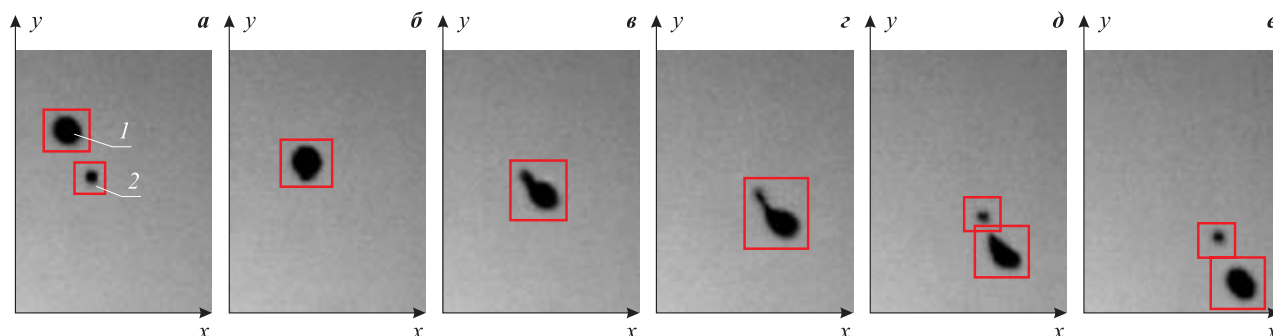


Рис. 11. Поле (а) и изолинии (б) скоростей “трассеров” при  $U_m = 1,5$  м/с и  $U_g = 1$  м/с ( $U_y$  — продольная составляющая скорости “трассеров”;  $U_m$  — абсолютная скорость “трассеров”)



**Рис. 12.** Последовательные кадры видеogramм столкновения каплеь воды в потоке высокотемпературных газов: *a* —  $t = 0$ ; *б* —  $t = 0,1$  мс; *в* —  $t = 0,2$  мс; *г* —  $t = 0,3$  мс; *д* —  $t = 0,4$  мс; *е* —  $t = 0,5$  мс

позволяет сделать вывод о том, что определение возможных режимов столкновений каплеь представляет собой перспективную задачу, которую можно решить с использованием экспериментальных методик, разработанных на базе панорамных оптических методов “трассерной” визуализации.

Из анализа условий снижения температуры и концентрации продуктов сгорания с учетом различных режимов коагуляции каплеь воды в рассматриваемых условиях установлено, что действие эффектов эндотермических фазовых превращений на подавление пламени и реакции окисления можно максимизировать только при распределенном во времени и пространстве полидисперсном распылении жидкости. В таком случае возможно существенное снижение затрачиваемых ресурсов жидкостных тушащих составов и повышение эффективности их использования.

### Заключение

Установленные в экспериментах особенности перемещения и испарения каплеь воды в зоне пламени иллюстрируют определяющее влияние на них процессов коагуляции. При этом выявлено несколько режимов реализации упомянутых процессов. Разработанные модели тепломассопереноса позволяют прогнозировать режим и характеристики коагуляции каплеь в пламени при различной дисперсности и размерах последних. Как следствие, при их применении возможно вычисление параметров распыления воды (размеры, дисперсность, скорости движения) в зоне пламени, обеспечивающих ее полное испарение и требуемое снижение температуры, а также концентрации продуктов сгорания.

\*\*\*

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-39-00003).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wighus R.* Water mist fire suppression technology — status and gaps in knowledge // Proceedings of the International Water Mist Conference. — Vienna, 2001. — P. 1–26.
2. *Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K.* Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles // Fire Safety Science: Proceeding of Eight International Symposium. — 2005. — Vol. 27. — P. 753–764.
3. *Соковиков В. В., Тугов А. Н., Гришин В. В., Камышев В. Н.* Автоматическое водяное пожаротушение с применением тонкораспыленной воды на электростанциях // Энергетик. — 2008. — № 6. — С. 37–38.
4. *Сегаль М. Д.* Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты кабельных сооружений АЭС // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2011. — № 4. — С. 61–64.
5. *Корольченко Д. А., Громовой В. Ю., Ворогушин О. О.* Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 11. — С. 54–57.
6. *Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J. T.* On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires // Suppression and Detection Research and Applications Conference. Orlando, USA, 2007.
7. *Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A.* Fire suppression test using a handheld water mist extinguisher designed for the International Space Station // 42<sup>nd</sup> International Conference on Environmental Systems. California, USA, 2012.

8. *Rodriquez B., Young G.* Development of International Space Station fine water mist portable fire extinguisher // 43<sup>rd</sup> International Conference on Environmental Systems. Vail, CO, 2013.
9. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 5. — С. 74–78.
10. *Стрижак П. А.* Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 8. — С. 26–31.
11. *Стрижак П. А.* Численный анализ процесса испарения капли, движущейся в струе воды через высокоскоростные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 9. — С. 17–22.
12. *Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Численное исследование тепломассопереноса при движении “тандема” капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. — 2012. — № 12. — С. 531–538.
13. *Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Тепломассоперенос при движении капель воды в высокотемпературной газовой среде // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 1. — С. 59–65.
14. *Стрижак П. А.* Влияние распределения капель в “водяном снаряде” на температуру и концентрацию продуктов сгорания в его следе // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 4. — С. 839–848.
15. *Волков Р. С., Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Экспериментальное исследование изменения массы капель воды при их движении через высокотемпературные продукты сгорания // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 6. — С. 1327–1332.
16. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Экспериментальное исследование полноты испарения распыленной воды при ее движении через пламя // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 10. — С. 15–24.
17. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Экспериментальное исследование особенностей движения капель распыленной тушащей жидкости на входе в зону пламени // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 12. — С. 16–23.
18. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Особенности испарения двух капель воды, движущихся последовательно через высокотемпературные продукты сгорания // Теплофизика и аэромеханика. — 2014. — Т. 21, № 2. — С. 269–272.
19. *Keane R. D., Adrian R. J.* Theory of cross-correlation analysis of PIV images // Applied Scientific Research. — 1992. — Vol. 49. — P. 191–215.
20. *Westerweel J.* Fundamentals of digital particle image velocimetry // Measurement Science and Technology. — 1997. — Vol. 8. — P. 1379–1392.
21. *Foucaut J. M., Stanislas M.* Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields // Measurement Science and Technology. — 2002. — Vol. 13. — P. 1058–1071.
22. *Ахметбеков Е. К., Маркович Д. М., Токарев М. П.* Корреляционная коррекция в методе слежения за частицами в потоках // Вычислительные технологии. — 2010. — Т. 15, № 4. — С. 57–72.
23. *Damaschke N., Nobach H., Tropea C.* Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics // Experiments in Fluids. — 2002. — Vol. 32, No. 2. — P. 143–152.
24. *Бильский А. В., Ложкин Ю. А., Маркович Д. М.* Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. — 2011. — Т. 18, № 1. — С. 1–13.
25. *Франк-Каменецкий Д. А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987. — 490 с.
26. *Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А.* Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. — М.: Наука, 1984. — 277 с.
27. *Терехов В. И., Пахомов М. А.* Тепломассоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. — 284 с.
28. *Муратова Т. М., Лабунцов Д. А.* Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // Теплофизика высоких температур. — 1969. — Т. 7, № 5. — С. 959–967.
29. *Кнаке О., Странский И. Н.* Механизм испарения // Успехи физических наук. — 1959. — Т. 68, № 2. — С. 261–305.

30. Авдеев А. А., Зудин Ю. Б. Кинетический анализ интенсивного испарения (метод обратных балансов) // Теплофизика высоких температур. — 2012. — Т. 50, № 4. — С. 565–574.
31. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.
32. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Особенности зажигания парогазовой смеси нагретой до высоких температур металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность. — 2008. — Т. 17, № 3. — С. 26–32.
33. Захаревич А. В., Стрижак П. А. Пожарная опасность взаимодействия источников ограниченного теплосодержания с легковоспламеняющимися жидкостями // Пожарная безопасность. — 2011. — № 4. — С. 70–75.
34. Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численное моделирование твердофазного зажигания металлизированного конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Химическая физика. — 2011. — № 12. — С. 35–42.
35. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние распределения капель воды в “водяном снаряде” на температуру в его следе // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 2. — С. 9–17.
36. Aggarwal S. K., Peng F. A review of droplet dynamics and vaporization modeling for engineering calculations // J. Eng. for Gas Turbines and Power. — 1995. — Vol. 117. — P. 453–461.
37. Shreiber A. A., Podvisotski A. M., Dubrovski V. V. Deformation and breakup of drops by aerodynamic loads // Atomization and Sprays. — 1996. — Vol. 6, No. 6. — P. 667–692.
38. Eggers J., Villermaux E. Physics of liquid jets // Rep. Prog. Phys. — 2008. — Vol. 71, 036601.
39. Sprittles J. E., Shikhmurzaev Y. D. Coalescence of liquid drops: Different models versus experiment // Phys. Fluids. — 2012. — Vol. 24, 122105.

Материал поступил в редакцию 15 октября 2014 г.

English

## DROPLETS DISPERSION INFLUENCE IN THE VAPOR-AND-WATER FLOW ON CHARACTERISTICS OF THEIR MOVEMENT AND EVAPORATION IN THE COMBUSTION FLAME ZONE

**VOLKOV R. S.**, Low Researcher of Automation Thermal and Power Processes Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: romanvolkov@tpu.ru)

**KUZNETSOV G. V.**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Theoretical and Industrial Heat Engineering Department, Institute of Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: elf@tpu.ru)

**KURILENKO E. Yu.**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Construction Mechanics Department, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering (Lunacharskogo St., 2, Tyumen, 625001, Russian Federation; e-mail: ksmeh@tgasu.ru)

**STRIZHAK P. A.**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Automation Thermal and Power Processes Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: pavelspa@tpu.ru)

### ABSTRACT

The article presents experimental and numerical investigation results of droplets dispersion influence in the vapor-and-water flow on characteristics of their movement and evaporation in the combustion flame zone. High-performance computer systems, methods of high-speed video registration and also modern technical means on the basis of panoramic optical methods of multiphase flows diagnostic were used for the experimental researches. It is established that the systematic measurement errors of droplets sizes and velocities are no more than 1.5 and 2.1 %.

Several characteristic modes of droplets coagulation at the movement through a flame are identified. The emergence reasons of each of the revealed modes are established and the corresponding images are presented. The typical videograms and velocity fields illustrating a turn of a vapor-droplet flow by a counter flow of high-temperature gases are shown. With use of numerical simulation methods the distributions of temperatures and concentration of combustion products in the vicinity

of water droplets are received. As a result of experimental and numerical results comparison the parameter characterizing a condition of braking and the subsequent droplets ablation is received.

It is shown that for a choice of water dispersion parameters in a flame zone it is expedient to use the developed theoretical models and experimental results.

**Keywords:** water vapor; water; droplets; vapor-and-water flow; flame; evaporation; temperature and concentration of combustion products.

## REFERENCES

1. Wighus R. Water mist fire suppression technology — status and gaps in knowledge. *Proceedings of the International Water Mist Conference*, Vienna, 2001, pp. 1–26.
2. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles. *Fire Safety Science: Proceeding of Eight International Symposium*, 2005, vol. 27, pp. 753–764.
3. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniyyem tonkoraspylennoy vody na elektrostantsiyakh [Automatic water fire extinguishing with using of sprayed water at power plants]. *Energetik — Power Engineer*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
4. Segal M. D. Ispolzovaniye tonkoraspylennoy vody dlya povysheniya protivopozharnoy zashchity kabelnykh sooruzheniy AES [The water mist system for cable construction of nuclear power plant fire protection]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 2011, no. 4, pp. 61–64.
5. Korol'chenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 54–57.
6. Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J. T. On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires. *Suppression and Detection Research and Applications Conference*, Orlando, USA, 2007.
7. Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A. Fire suppression test using a handheld water mist extinguisher designed for the International Space Station. *42<sup>nd</sup> International Conference on Environmental Systems*, California, USA, 2012.
8. Rodriquez B., Young G. Development of International Space Station fine water mist portable fire extinguisher. *43<sup>rd</sup> International Conference on Environmental Systems*, Vail, CO, 2013.
9. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennaya otsenka optimalnykh razmerov kapel vody v usloviyakh yeye raspyleniya sredstvami pozharotusheniya v pomeshcheniyakh [Numerical estimation of optimum sizes for water drops at the conditions of its dispersion by firefighting devices at placements]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 74–78.
10. Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye usloviy ispareniya sovokupnosti kapel vody pri dvizhenii v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical investigation of evaporation conditions for set of water drops at the moving after high temperature gas mixture]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 8, pp. 26–31.
11. Strizhak P. A. Chislennyy analiz protsessy ispareniya kapli, dvizhushcheysya v struye vody cherez vysokoskorostnyye produkty sgoraniya [Numerical analysis of evaporation process for droplet moving at the water jet through high temperature combustion products]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 9, pp. 17–22.
12. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye teplomassoperenosa pri dvizhenii “tandem” kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical research of heat-and-mass transfer at movement of water drops “tandem” in the high temperature gas mixture]. *Teplovyye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2012, vol. 21, no. 12, pp. 531–538.
13. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Teplomassoperenos pri dvizhenii kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Heat-and-mass transfer at water drops movement in the high-temperature gas mixture]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 59–65.
14. Strizhak P. A. Vliyaniye raspredeleniya kapel v “vodyanom snaryade” na temperaturu i kontsentratsiyu produktov sgoraniya v yego slede [Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 4, pp. 839–848.

15. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye izmeneniya massy kapel vody pri ikh dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 6, pp. 1327–1332.
16. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye polnoty ispareniya raspylennoy vody pri yeye dvizhenii cherez plamya [Experimental investigation of evaporation integrity for sprayed water at moving through flame]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 10, pp. 15–24.
17. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye osobennostey dvizheniya kapel raspylennoy tushashchey zhidkosti na vkhode v zonu plameni [Experimental investigation of sprayed extinguishing liquid drops moving features on the entering into the flame]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 16–23.
18. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Osobennosti ispareniya dvukh kapel vody, dvizhushchikh-sya posledovatelno cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 269–272.
19. Keane R. D., Adrian R. J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Applied Scientific Research*, 1992, vol. 49, pp. 191–215.
20. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 1997, vol. 8, pp. 1379–1392.
21. Foucaut J. M., Stanislas M. Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields. *Measurement Science and Technology*, 2002, vol. 13, pp. 1058–1071.
22. Akhmetbekov Ye. K., Markovich D. M., Tokarev M. P. Korrelyatsionnaya korrektsiya v metode slezheniya za chastitsami v potokakh [Correlation correction in a method of tracking particles in streams]. *Vychislitelnyye tekhnologii — Computing Technologies*, 2010, vol. 15, no. 4, pp. 57–72.
23. Damaschke N., Nobach H., Tropea C. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics. *Experiments in Fluids*, 2002, vol. 32, no. 2, pp. 143–152.
24. Bilskiy A. V., Lozhkin Yu. A., Markovich D. M. Interferometricheskii metod izmereniya diametrov kapel [Interferometric method for measurement of droplets diameters]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 1–13.
25. Frank-Kamenetskiy D. A. Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 490 p.
26. Paskonov V. M., Polezhaev V. I., Chudov L. A. *Chislennoye modelirovaniye protsessov teplo- i masso-obmena* [Numerical simulation of heat-and mass transfer processes]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 277 p.
27. Terekhov V. I., Pakhomov M. A. *Teplomassoperenos i gidrodinamika v gazokapelnnykh potokakh* [Heat-and-mass transfer and hydrodynamics in a gas-droplet streams]. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2009. 284 p.
28. Muratova T. M., Labuntsov D. A. Kineticheskiy analiz protsessov ispareniya i kondensatsii [Kinetic analysis of evaporation and condensation processes]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 1969, vol. 7, no. 5, pp. 959–967.
29. Knake O., Stranskiy I. N. Mekhanizm ispareniya [The mechanism of evaporation]. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Achievements of Physical Sciences*, 1959, vol. 68, no. 2, pp. 261–305.
30. Avdeev A. A., Zudin Yu. B. Kineticheskiy analiz intensivnogo ispareniya (metod obratnykh balansov) [Kinetic analysis of intensive evaporation (the method of inverse balances)]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2012, vol. 50, no. 4, pp. 565–574.
31. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Bases of the heat exchange theory]. Moscow, Atomizdat, 1979. 416 p.
32. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Osobennosti zazhiganiya parogazovoy smesi nagretoy do vysokikh temperatur metallicheskoy chastitsey [The ignition features of steam-gas mix by the metal particle heated to high temperatures]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2008, vol. 17, no. 3, pp. 26–32.
33. Zakharevich A. V., Strizhak P. A. Pozharnaya opasnost vzaimodeystviya istochnikov ogranichenogo teplosoderzhaniya s legkovosplamenyayushchimisya zhidkostyami [Fire danger of interaction of limited heat content sources with flammable liquids]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2011, no. 4, pp. 70–75.



34. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennoye modelirovaniye tverdogaznogo zazhiganiya metallizirovannogo kondensirovannogo veshchestva nagretoy do vysokikh temperatur chastitsey [Numerical simulation of solid-phase ignition of metallized condensed matter by a particle heated to a high temperature]. *Khimicheskaya fizika — Physical Chemistry*, 2011, no. 12, pp. 35–42.
35. Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye raspredeleniya kapel vody v “vodyanom snaryade” na temperaturu v yego slede [Influence of water droplets distribution in the “water shell” on temperature in follow movement]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 9–17.
36. Aggarwal S. K., Peng F. A review of droplet dynamics and vaporization modeling for engineering calculations. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1995, vol. 117, pp. 453–461.
37. Shreiber A. A., Podvisotski A. M., Dubrovski V. V. Deformation and breakup of drops by aerodynamic loads. *Atomization and Sprays*, 1996, vol. 6, no. 6, pp. 667–692.
38. Eggers J., Villermaux E. Physics of liquid jets. *Reports on Progress in Physics*, 2008, vol. 71, 036601.
39. Sprittles J. E., Shikhmurzaev Y. D. Coalescence of liquid drops: Different models versus experiment. *Physics of Fluids*, 2012, vol. 24, 122105.



# Издательство «ПОЖНАУКА»

## Представляет книгу

### ОГNETУШИТЕЛИ. УСТРОЙСТВО. ВЫБОР. ПРИМЕНЕНИЕ Д. А. Корольченко, В. Ю. Громовой



В учебном пособии приведены классификация огнетушителей и конструкции основных их типов, средства тушения, используемые для зарядки огнетушителей, виды огнетушителей и правила их применения для ликвидации загораний различных веществ, рекомендации по расчету необходимого количества огнетушителей для разных объектов, по их размещению, хранению и техническому обслуживанию.

Рекомендации, содержащиеся в книге, разработаны на основе современных нормативных документов, регламентирующих конструкцию, условия применения, правила эксплуатации и технического обслуживания огнетушителей.

Учебное пособие рассчитано на широкий круг читателей: инженерно-технических работников предприятий и организаций, ответственных за оснащение объектов огнетушителями, поддержание их в работоспособном состоянии и своевременную перезарядку; преподавателей курсов пожарно-технического минимума и дисциплины “Основы безопасности жизнедеятельности” в средних и высших учебных заведениях; частных лиц, выбирающих огнетушитель для обеспечения безопасности квартиры, дачи или автомобиля.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03;  
e-mail: mail@firepress.ru; www.firepress.ru

**С. Г. АЛЕКСЕЕВ**, канд. хим. наук, доцент, чл.-корр. ВАН КБ, старший научный сотрудник Научно-инженерного центра "Надежность и ресурс больших систем и машин" УрО РАН (Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54а); старший научный сотрудник Уральского института ГПС МЧС России (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; e-mail: Alexshome@mail.ru)

**Л. К. МАВЛЮТОВА**, аспирант Научно-инженерного центра "Надежность и ресурс больших систем и машин" УрО РАН (Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54а; e-mail: mavly-lilya@mail.ru)

**А. Ю. КОШЕЛЕВ**, старший преподаватель Уральского института ГПС МЧС России (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22); соискатель Научно-инженерного центра "Надежность и ресурс больших систем и машин" УрО РАН (Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54а; e-mail: Alekshelev@mail.ru)

**Н. М. БАРБИН**, д-р техн. наук, канд. хим. наук, заведующий кафедрой химии Уральского государственного аграрного университета (Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42); старший научный сотрудник Уральского института ГПС МЧС России (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; e-mail: NMBarbin@mail.ru)

УДК 614.841.41:547.222

## СВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ С ХИМИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМ. XVII. ДИХЛОРАЛКАНЫ

Изучена взаимосвязь химического строения и пожароопасных свойств в ряду дихлоралканов. Показано, что для этих соединений удовлетворительно работает правило углеродной цепи, которое позволяет прогнозировать их физико-химические и пожароопасные показатели. Предложены эмпирические уравнения для расчета критического давления ( $P_k$  (атм) =  $-47,739 (\ln N_c)^{0,5} + 92,31$ ), теплоты образования ( $H_{обр}$  (кДж/моль) =  $-(20,639N_c + 74,83)$ ), теплоты сгорания ( $H_{сг}$  (кДж/моль) =  $-(615,16N_c - 132,02)$ ), критической температуры ( $T_{кр}$  (К) =  $0,155N_c^3 - 5,222N_c^2 + 66,062N_c + 449,3$ ), температуры кипения ( $T_{кип}$  (К) =  $0,105N_c^3 - 3,588N_c^2 + 53,726N_c + 262,6$ ), температуры вспышки ( $T_{всп}$  (К) =  $16,663N_c + 250,5$ ,  $t_{всп}$  (°С) =  $0,848t_{кип} - 92,2$ ), нижнего и верхнего температурных пределов воспламенения ( $T_n$  (К) =  $-0,822N_c^2 + 25,35N_c + 231,5$ ,  $T_v$  (К) =  $-1,086T_n + 16,9$ ). Для дихлоралканов линейного строения  $N_c$  – количество атомов углерода. Для соединений изомерного строения параметр  $N_c$  равен длине условной углеродной цепи, определяемой в соответствии с правилом углеродной цепи. Дан прогноз ранее неизвестных физико-химических и пожароопасных свойств ряда дихлоралканов.

**Ключевые слова:** дихлоралкан; температура вспышки; зависимость; прогноз; хемоинформатика.

Изучение количественной взаимосвязи *структура – свойство*, или QSPR (Quantitative Structure – Property Relationship), является одним из направлений хемоинформатики (Cheminformatics) [1–26]. В предыдущих работах были представлены результаты QSPR-исследований различных монозамещенных органических соединений [11–25], а также диалкилбензолов и  $\alpha, \omega$ -аминоспиртов [22, 26]. В настоящей статье в качестве объекта исследования выбраны дихлоралканы, которые применяются в качестве реагентов в органическом синтезе, а также хлористый метилен (дихлорметан) и дихлорэтан, которые широко используются в качестве органических растворителей в промышленности и быту.

В табл. 1 приведены данные, использованные в качестве исходной базы для нашего QSPR-исследования. Это показатели физико-химических и пожароопасных свойств  $\alpha, \omega$ -дихлоралканов (I)–(XII),

взятые из электронных баз данных и справочной литературы [27–32], а также рассчитанные по методам Лидерсена (критическая температура  $T_{кр}$  (К)), Риделя – Лидерсена (критическое давление  $P_{кр}$  (атм)), Батлера (температура вспышки  $T_{всп}$  (К)), Монахова (нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения (КПВ)  $C_n$  и  $C_v$  (% об.)), Гесса (энтальпия (теплота) сгорания  $H_{сг}$  (кДж/моль)) [32–34], с помощью программного комплекса ChemBioOffice 2012 (температура кипения  $T_{кип}$  (К),  $T_{кр}$ ,  $P_{кр}$ , энтальпия (теплота) образования  $H_{обр}$  (кДж/моль), топологический индекс Винера  $W$ ). Кроме того, по уравнениям (1)–(3) из ГОСТ 12.1.044–89\* были рассчитаны нижний ( $T_n$ ) (верхний  $T_v$ ) температурный предел воспламенения (распространения пламени)  $T_n$  (К), температуры вспышки и кипения  $t_{всп}$  и  $t_{кип}$  (°С) [34]:

$$T_{\text{п}} = \frac{B}{A - \lg(C_{\text{п}} P_0 \cdot 0,01)} - C; \quad (1)$$

$$t_{\text{всп}} = -73,14 + 0,659t_{\text{кип}} + \sum_{j=1}^n a_j l_j; \quad (2)$$

$$t_{\text{всп}} = -39,6 + 0,79t_{\text{кип}} - 0,0147|H_{\text{сг}}|, \quad (3)$$

где  $A, B, C$  — константы Антуана [35];

$C_{\text{п}}$  — нижний (верхний) концентрационный предел воспламенения (распространения пламени), % (об.);

$P_0$  — атмосферное давление, атм;

$a_j, l_j$  — количество и дескриптор  $j$ -й группы.

Дефицит данных и сомнительность ряда значений концентрационных пределов воспламенения  $\alpha, \omega$ -дихлоралканов (I)–(XII) не позволяют найти хорошие корреляционные зависимости показателей физических и пожароопасных свойств этих соединений от числа атомов углерода  $N_{\text{C}}$ .

Результаты прогноза по аппроксимационному уравнению Монахова (4) [33] также плохо согласуются с литературными данными по концентрационным пределам  $\alpha, \omega$ -дихлоралканов (I)–(XII) (см. табл. 1). В то же время использование вычисленных по формуле (4) значений концентрационных пределов дает приемлемый прогноз температурных пределов воспламенения соединений (I)–(XII) по уравнению (1) (см. табл. 1):

$$C_{\text{п}} = \frac{100}{a\beta + b}, \quad (4)$$

где  $a, b$  — константы [30, 33];

$\beta$  — стехиометрический коэффициент.

Установлено, что уравнение (3) для расчета температуры вспышки в ряду  $\alpha, \omega$ -дихлоралканов имеет ограничение по  $N_{\text{C}}$  ( $N_{\text{C}} < 8$ ).

С помощью программных комплексов Microsoft Excel 2010 и TableCurve 2D (версия 5.01) получены эмпирические зависимости (5)–(21) для прогнозирования физико-химических и пожароопасных свойств дихлоралканов линейного строения (табл. 2).

Данные по температуре самовоспламенения дихлоралканов мало пригодны для QSPR-исследования. Анализ ее значений, приведенных в табл. 1, показывает, что начиная с 1,4-дихлорбутана она практически не изменяется, а наблюдаемые незначительные различия лежат в пределах экспериментальной ошибки.

Ранее [36] для дихлоралканов была найдена линейная зависимость температуры вспышки от их температуры кипения:

$$t_{\text{всп}} = 0,61t_{\text{кип}} - 44,6. \quad (22)$$

Обработка данных табл. 1 показывает, что модифицированное уравнение Орманди – Крэвэна имеет следующий вид:

$$t_{\text{всп}} = 0,601t_{\text{кип}} - 39 \quad (r^2 = 0,9606). \quad (23)$$

Исключение хлористого метилена (I), дихлорэтана (II) и 1,3-дихлорпропана (III) из корреляционной зависимости  $t_{\text{всп}} = f(t_{\text{кип}})$  позволяет повысить квадрат коэффициента корреляции до 0,9918 (см. уравнение (21) в табл. 2).

Прогноз, полученный по формулам (5)–(21) (см. табл. 1) и по правилу углеродной цепи [1–13], в целом неплохо согласуется с литературными экспериментальными и расчетными показателями физико-химических и пожароопасных свойств  $\alpha, \omega$ -дихлоралканов (I)–(XII).

В табл. 3 приведены справочные данные по физико-химическим и пожароопасным свойствам дихлоралканов изомерного строения [27–32], а также рассчитанные по методам Лидерсена ( $T_{\text{кр}}$ ), Риделя – Лидерсена ( $P_{\text{кр}}$ ), Батлера ( $T_{\text{всп}}$ ), Гесса ( $H_{\text{сг}}$ ) [32–34] и с помощью программного комплекса ChemBio-Office 2012 ( $T_{\text{кип}}$ ,  $T_{\text{кр}}$ ,  $P_{\text{кр}}$ ,  $H_{\text{обр}}$ ,  $W$ ).

В табл. 3 приведен прогноз  $P_{\text{кр}}$ ,  $H_{\text{обр}}$  и  $H_{\text{сг}}$  для дихлоралканов (XIII)–(XXXVII), полученный по уравнениям (6)–(8), (14)–(16) и по правилу углеродной цепи. В предыдущих работах [11, 13–17, 19–26] было показано, что для определения температурных показателей соединений изомерного строения используется не число атомов углерода  $N_{\text{C}}$ , а длина условной углеродной цепи (УУЦ). В монофункциональных соединениях введение метильного, этильного, пропильного, бутильного заместителей формально удлиняет основную углеродную цепь (ОУЦ) соответственно на 0,5; 1,5; 2,5 и 3,5. Специфика бифункциональных органических веществ, включая дихлоралканы, заключается в том, что углеродная цепь может расти как за счет удлинения ОУЦ, так и за счет введения алкильных заместителей (рис. 1).

При этом присутствие второй функциональной группы вносит свои коррективы в ранее установленный алгоритм определения УУЦ. Обнаружено, что в ряду дихлоралканов добавление метильного радикала к молекуле удлиняет ОУЦ не на 0,5, а на 0,25. Рассмотрим это на конкретных примерах. Из рис. 2 видно, что ОУЦ (выделена прямоугольником) 1,1-дихлорэтана (XIII) равна 1. Для определения УУЦ этого соединения необходимо к ОУЦ добавить вклад метильной группы, т. е. 0,25. Таким образом, его УУЦ будет равна 1,25. Аналогично вычисляется УУЦ 1-метил-1,2-дихлорэтана<sup>1</sup> (1,2-дихлорпропана) (XIV), 1-метил-1,3-дихлорпропана (1,3-дихлорбутана) (XV),

<sup>1</sup> Для удобства обсуждения названия исследуемых соединений даны относительно ОУЦ. В скобках приведены названия по номенклатуре ИЮПАК (IUPAC).

Таблица 1. Справочные и расчетные физико-химические и пожароопасные свойства нормальных дихлоралканов

Формула, номер, (ОУЦ), <i>W</i>	<i>P</i> <sub>кр</sub> , атм	Теплота, кДж/моль		Температура, К						КПВ, % (об.)	
		<i>H</i> <sub>обр</sub>	<i>H</i> <sub>сг</sub>	<i>T</i> <sub>кр</sub>	<i>T</i> <sub>кип</sub>	<i>T</i> <sub>всп</sub>	<i>T</i> <sub>н</sub>	<i>T</i> <sub>в</sub>	<i>T</i> <sub>свс</sub>	<i>C</i> <sub>н</sub>	<i>C</i> <sub>в</sub>
ClCH <sub>2</sub> Cl <b>I</b> (1) 4	60,00	-95,5 <sup>P</sup>	-513,9 <sup>P</sup>	510	313	265	268 <sup>P</sup>	276 <sup>P</sup>	888	14	22
	58,3 <sup>P</sup>	-95,5	-448 <sup>P</sup>	507 <sup>P</sup>	310 <sup>P</sup>	259	256♦	293♦	829	12	19
	51,2 <sup>P</sup>	-93,7	-483,1 <sup>P</sup>	569 <sup>P</sup>	297 <sup>P</sup>	259 <sup>P</sup>	256	295	935	7,5 <sup>P</sup>	47,4 <sup>P</sup>
			-483,1 -469,6	510 513	313 317	257♦ 258♦	258 297	297 853			
Cl(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> Cl <b>II</b> (2) 10	52,90	-129,8 <sup>P</sup>	-1105,0 <sup>P</sup>	562	357	286	281 <sup>P</sup>	308 <sup>P</sup>	686	4,5	16
	53,00	-116,1 <sup>P</sup>	-1241,0 <sup>P</sup>	563	356	282	278♦	340 <sup>P</sup>		6,2	16,2
	48,1 <sup>P</sup>	-116,1	-1076	564 <sup>P</sup>	357 <sup>P</sup>	289 <sup>P</sup>	279	320♦		3,8 <sup>P</sup>	27,3 <sup>P</sup>
	47,3 <sup>P</sup>	-116,0	-1098,3 <sup>P</sup>	562 <sup>P</sup>	320 <sup>P</sup>	286♦	276	320			
	52,6	-116,1*	-1098,3	593 <sup>P</sup>	357	283♦	278*	317			
	52,9 50,9*		-1107,0 -1098,3*	562 557	352 359	284 283*		319*			
Cl(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> Cl <b>III</b> (3) 20	40,96	-159,2 <sup>P</sup>	-1707,0 <sup>P</sup>	603	394	305	305 <sup>P</sup>	336 <sup>P</sup>	753	3,4	14,5
	41,75	-136,7 <sup>P</sup>	-1752,0 <sup>P</sup>	587	394 <sup>P</sup>	294	300♦	344♦		2,5 <sup>P</sup>	19,2 <sup>P</sup>
	41,0 <sup>P</sup>	-136,7	-1713,5 <sup>P</sup>	607 <sup>P</sup>	343 <sup>P</sup>	305 <sup>P</sup>	300	343			
	39,6 <sup>P</sup>	-137,2	-1713,5	608 <sup>P</sup>	394	310♦	299	342			
	42,3	-136,8*	-1723,3	615 <sup>P</sup>	392	304♦	299*	343*			
	42,0 44,3*		-1713,5*	605 604 602*	397 392* 300*	300 300*					
Cl(CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> Cl <b>IV</b> (4) 35	35,63	-179,0 <sup>P</sup>	-2320,0 <sup>P</sup>	641	428	325	317 <sup>P</sup>	337 <sup>P</sup>	493	1,5	4
	35,6 <sup>P</sup>	-157,4 <sup>P</sup>	-2328,6 <sup>P</sup>	646 <sup>P</sup>	427	314	320♦	366♦		1,8	8,9
	35,1 <sup>P</sup>	-157,4	-2328,6	644 <sup>P</sup>	435	313	320	364		1,9 <sup>P</sup>	14,8 <sup>P</sup>
	36,1	-158,1	-2334,6	635 <sup>P</sup>	427 <sup>P</sup>	314 <sup>P</sup>	320*	365			
	35,6	-157,4*	-2328,6*	640	366 <sup>P</sup>	333♦		366*			
	36,6*			641 636*	427 425*	321♦ 317					
						314 313 <sup>#</sup> 312 <sup>#</sup> 318*					
Cl(CH <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> Cl <b>V</b> (5) 56	32,48	-200,0 <sup>P</sup>	-2926,0 <sup>P</sup>	668	456	343	342 <sup>P</sup>	378 <sup>P</sup>		1,7	8,6
	31,5 <sup>P</sup>	-178,0 <sup>P</sup>	-2943,8 <sup>P</sup>	674 <sup>P</sup>	336	336	340♦	387♦		1,5 <sup>P</sup>	12,0 <sup>P</sup>
	31,4 <sup>P</sup>	-178,0	-2943,8	653 <sup>P</sup>	453 <sup>P</sup>	299	338	384			
	31,7	-178,7	-2945,1	668	389 <sup>P</sup>	300 <sup>P</sup>	339	385			
	31,3	-178,1*	-2943,8*	670	455	352♦	337*	382*			
	32,0*			667*	453 452*	335♦ 334 335 336 <sup>#</sup> 331*					
Cl(CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> Cl <b>VI</b> (6) 84	28,3 <sup>P</sup>	-198,7 <sup>P</sup>	-3558,9 <sup>P</sup>	692 <sup>P</sup>	477	347	354♦	398♦	477	5,3	10,5
	28,4	-198,7	-3558,9	670 <sup>P</sup>	477 <sup>P</sup>	350	354	401	473	1,3 <sup>P</sup>	9,0 <sup>P</sup>
	28,1	-199,3	-3556,4	691	412 <sup>P</sup>	358	355	402			
	28,5*	-198,7*	-3559,0*	692 689*	478 479	347 <sup>P</sup> 352♦	354*	401*			
					476 478*	342♦ 350					
						351 354 <sup>#</sup> 352*					

Формула, номер, (ОУЦ), <i>W</i>	<i>P</i> <sub>кр</sub> , атм	Теплота, кДж/моль		Температура, К						КПВ, % (об.)	
		<i>H</i> <sub>обр</sub>	<i>H</i> <sub>сг</sub>	<i>T</i> <sub>кр</sub>	<i>T</i> <sub>кип</sub>	<i>T</i> <sub>всп</sub>	<i>T</i> <sub>н</sub>	<i>T</i> <sub>в</sub>	<i>T</i> <sub>свс</sub>	<i>C</i> <sub>н</sub>	<i>C</i> <sub>в</sub>
Cl(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> Cl <b>VII</b> (7) 120	25,6 <sup>P</sup> 25,7 25,6 25,9*	-219,3 <sup>P</sup> -219,3 -219,8 -219,3*	-4174,1 <sup>P</sup> -4174,1 -4169,1 -4174,1*	<b>686<sup>P</sup></b> 709 708*  500 497 497*	494 <sup>P</sup> <b>434<sup>P</sup></b> 499 500 497 497*	<b>356<sup>P</sup></b> <b>380<sup>♦</sup></b> <b>351<sup>♦</sup></b> 367 366 367*	368 <sup>♦</sup> 369 367*	415 <sup>♦</sup> 417 418 414*		1,1 <sup>P</sup>	8,4 <sup>P</sup>
Cl(CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> Cl <b>VIII</b> (8) 165	23,4 <sup>P</sup> 23,5 23,6*	-239,9 <sup>P</sup> -239,9 -240,2 -240,0*	-4789,3 <sup>P</sup> -4789,3 -4783,4 -4789,3*	723 <sup>P</sup> <b>700<sup>P</sup></b> 723 721*	516 <b>514<sup>P</sup></b> <b>457<sup>P</sup></b> 517 515 515*	<b>391</b> 382 <b>382<sup>P</sup></b> <b>392<sup>♦</sup></b> <b>355<sup>♦</sup></b> 384 382 387 <sup>#</sup> 384*	380 <sup>♦</sup> 382 381*	430 <sup>♦</sup> 431 430*	488	1,0 <sup>P</sup>	7,9 <sup>P</sup>
Cl(CH <sub>2</sub> ) <sub>9</sub> Cl <b>IX</b> (9) 220	21,6 <sup>P</sup> <b>21,2<sup>P</sup></b> 21,5 21,7 21,7*	-260,6 <sup>P</sup> -260,6 -260,6*	-5404,4 <sup>P</sup> -5404,4 -5399,4 -5404,5*	732 <sup>P</sup> <b>714<sup>P</sup></b> 734 734*	531 <b>533<sup>P</sup></b> <b>523<sup>P</sup></b> 532 533 532*	> <b>385</b> <b>480<sup>P</sup></b> <b>402<sup>♦</sup></b> <b>358<sup>♦</sup></b> 400 399 400 <sup>#</sup> 402*	393 392*	444 443 444*		0,9 <sup>P</sup>	7,4 <sup>P</sup>
Cl(CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> Cl <b>X</b> (10) 286	20,0 <sup>P</sup> <b>19,4<sup>P</sup></b> 19,9 20,1 20,1*	-281,2 <sup>P</sup> -281,2 -281,0 -281,3*	-6019,6 <sup>P</sup> -6019,6 -6017,0 -6019,6*	745 <sup>P</sup> <b>727<sup>P</sup></b> 743 741*	548 <b>557<sup>P</sup></b> <b>503<sup>P</sup></b> 546 547 545*	419 <b>386</b> <b>382<sup>P</sup></b> <b>413<sup>♦</sup></b> <b>362<sup>♦</sup></b> 417 419 414 <sup>#</sup> 417*	404 <sup>♦</sup> 403 402*	457 <sup>♦</sup> 454 454*	493	0,5 0,8 <sup>P</sup>	7,0 <sup>P</sup>
Cl(CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> Cl <b>XI</b> (11) 364	18,6 <sup>P</sup> <b>17,9<sup>P</sup></b> 18,4 18,6 18,7*	-301,9 <sup>P</sup> -301,9 -301,4 -301,9*	-6634,7 <sup>P</sup> -6634,7 -6636,3 -6634,8*	<b>739<sup>P</sup></b> 750 751 752*	<b>526<sup>P</sup></b> 559 561 560*	<b>421<sup>♦</sup></b> <b>362<sup>♦</sup></b> 434 435*	411 411*	463 464 464*		0,7 <sup>P</sup>	6,7 <sup>P</sup>
Cl(CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> Cl <b>XII</b> (12) 455	17,4 <sup>P</sup> <b>16,5<sup>P</sup></b> 17,1 17,2	-322,5 <sup>P</sup> -322,5 -321,8	-7249,9 <sup>P</sup> -7249,9 -7257,2	758 <sup>P</sup> <b>750<sup>P</sup></b> 758	572 <b>579<sup>P</sup></b> <b>549<sup>P</sup></b> 572 571 570 574	<b>401</b> <b>401<sup>P</sup></b> <b>429<sup>♦</sup></b> <b>363<sup>♦</sup></b> 450 454	417 419	470 472	483	0,6 <sup>P</sup>	6,3 <sup>P</sup>

Примечания:

1. *T*<sub>свс</sub> — температура самовоспламенения.
2. Символом “P” обозначены расчетные величины, полученные из справочной литературы [28–32] или вычисленные по известным формулам [32–34]; “♦” — рассчитанные по уравнениям (1)–(3).
3. Курсивом выделены прогнозные значения, полученные расчетом по уравнениям (5)–(20) (табл. 2), курсивом с символом “\*” — по правилу углеродной цепи, с символом “#” — по формуле (21). Жирным шрифтом выделены значения, которые не учитывались при выводе уравнений (5)–(21).

2-метил-1,3-дихлорпропана (**XVI**), 1-метил-1,4-дихлорбутана (1,4-дихлорпентана) (**XVII**) и 2-метил-1,4-дихлорбутана (**XVIII**). Необходимо отметить, что

перемещение метильной группы вдоль углеродной цепи молекулы дихлоралкана не приводит к существенному изменению физико-химических и пожаро-

Таблица 2. Уравнения для прогнозирования физико-химических и пожароопасных свойств дихлоралканов (I)–(XII)

Уравнение, единицы измерения	Номер уравнения	$r^2$	Область применения
$P_{кр} = -47,739(\ln N_C)^{0,5} + 92,31$ атм	(5)	0,9994	$2 \leq N_C \leq 12$
$H_{обр} = -(20,639 N_C + 74,83)$ кДж/моль	(6)	0,9999	$1 \leq N_C \leq 12$
$H_{сг} = -(615,16 N_C - 132,02)$ кДж/моль	(7)	1,0000	$1 \leq N_C \leq 12$
$T_{кр} = 0,155 N_C^3 - 5,222 N_C^2 + 66,062 N_C + 449,3$ К	(8)	0,9998	$1 \leq N_C \leq 12$
$T_{кип} = 0,105 N_C^3 - 3,588 N_C^2 + 53,726 N_C + 262,6$ К	(9)	0,9999	$1 \leq N_C \leq 12$
$T_{всп} = 16,663 N_C + 250,5$ К	(10)	0,9973	$1 \leq N_C \leq 12$
$T_H = -0,822 N_C^2 + 25,35 N_C + 231,5$ К	(11)	0,9995	$1 \leq N_C \leq 12$
$T_B = 1,086 T_H + 16,9$ К	(12)	0,9990	$1 \leq N_C \leq 12$
$P_{кр} = 381,91 \ln (W/N_C)^{1,5} - 896,18 \ln (W/N_C) + 773,87 \ln (W/N_C)^{0,5} - 217,47$ атм	(13)	0,9999	$2 \leq N_C \leq 12$
$H_{обр} = -(31,753 (WN_C)^{0,25} + 48,83)$ кДж/моль	(14)	0,9999	$1 \leq N_C \leq 12$
$H_{сг} = -(855,45 (WN_C)^{0,25} - 757,05)$ кДж/моль	(15)	0,9999	$1 \leq N_C \leq 12$
$T_{кр} = -225,45 \ln (W/N_C) + 1030,3 \ln (W/N_C)^{0,5} - 387,24$ К	(16)	0,9993	$1 \leq N_C \leq 12$
$T_{кип} = -57,217 \ln (W/N_C) + 523,4 \ln (W/N_C)^{0,5} - 219,9$ К	(17)	0,9993	$1 \leq N_C \leq 12$
$T_{кип} = 62,637 \ln (MW^{2/3}) - 24,65$ К	(18)	0,9994	$1 \leq N_C \leq 12$
$T_{всп} = 124,83 (W/N_C)^{0,9} - 857,44 (W/N_C)^{0,6} + 2070,7 (W/N_C)^{0,3} - 1384,1$ К	(19)	0,9994	$3 < N_C \leq 10$
$T_H = -549,88 W/N_C + 1979,3 (W/N_C)^{0,5} - 1290$ К	(20)	0,9992	$1 \leq N_C \leq 12$
$t_{всп} = 0,848 t_{кип} - 92,2$ °С	(21)	0,9918	$3 < N_C \leq 10$

Примечание.  $M$  — молекулярная масса, кг/кмоль;  $r$  — коэффициент корреляции.

опасных показателей (см. табл. 3, XV и XVI, XVII и XVIII). Это явление нами названо свойством алкильной группы. Подобное наблюдается в различных классах органических соединений с одной функциональной группой и диалкилбензолах<sup>2</sup> [11, 13–17, 18–25].

УУЦ дихлоралканов с этильным радикалом определяется как сумма ОУЦ, метиленового и метильного фрагментов. Вклад  $CH_3$  также равен 0,25, а вклад  $CH_2$ -группы — 0,75. Примеры определения УУЦ дихлорэтилалканов (XIX)–(XXII) приведены на рис. 3. Перемещение этильного заместителя вдоль ОУЦ соединений (XXI) и (XXII), как видно из табл. 3, также не приводит к существенным изменениям физико-химических и пожароопасных показателей этих веществ. Аналогично вычисляется УУЦ пропилдихлорметана (1,1-дихлорбутана) (XXIII), пропил-1,2-дихлорэтана (1,2-дихлорпентана) (XXIV), 1-пропил-1,3-дихлопропана (1,3-дихлоргексана) (XXV) и 2-про-

пил-1,3-дихлопропана (1-хлор-2-(хлорметил)-пентана) (XXVI) (рис. 4).

В случае диалкилдихлоралканов возникает потребность во введении дополнительной поправки  $\Delta$  на второй заместитель. В результате анализа данных табл. 3 установлено, что она определяется как  $(m - 1) \cdot 0,25$  (где  $m$  — число алкильных заместителей в ОУЦ и в боковых цепях). Для ди-, три-, тетра-, пента- и гексаалкилдихлоралканов поправка  $\Delta$  будет равна соответственно 0,25; 0,5; 0,75; 1 и 1,25. Для удобства нахождения  $\Delta$  алкильные заместители на рис. 2–5 выделены овалами. Примеры вычисления УУЦ диалкилдихлоралканов (XXVII)–(XXXVII) приведены на рис. 5.

Для изомерных дихлоралканов (XIII)–(XXXVII) в табл. 3 приведены результаты расчета  $T_{кр}$ ,  $T_{кип}$ ,  $T_{всп}$  и  $T_H$  по уравнениям (9)–(12) и (17)–(21), в которые вместо  $N_C$ ,  $W$  и  $M$  подставлены значения соответственно УУЦ, приведенного индекса Винера  $W^*$  и приведенной молекулярной массы  $M^*$ <sup>3</sup>. Прогнозирование физико-химических и пожароопасных показателей соединений (XIII)–(XXXVII) по правилу углеродной цепи также представлено в табл. 3. Значения  $T_B$  определены по формуле (13) исходя из вычисленных значений  $T_H$ . Для сравнения выполнены

<sup>2</sup> В работе [22] диалкилбензолы рассмотрены как соединения с одной функциональной группой (бензольный цикл). Для монофункционально замещенных алканов перемещение вдоль ОУЦ не только алкильного заместителя, но и самой функциональной группы не приводит к существенным изменениям физико-химических и пожароопасных свойств. Для дихлоралканов перемещение атома хлора вдоль ОУЦ приводит к изменению УУЦ, а следовательно, и показателей дихлоралканов.

<sup>3</sup>  $M^* = 14,027 \text{ УУЦ} + 70,906$ .

Таблица 3. Справочные и расчетные физико-химические и пожароопасные свойства дихлоралканов изомерного строения

Номер, (УУЦ), W/W*	P <sub>кр</sub> , атм	Теплота, кДж/моль		Температура, К				
		H <sub>обр</sub>	H <sub>ст</sub>	T <sub>кр</sub>	T <sub>кип</sub>	T <sub>всп</sub>	T <sub>н</sub>	T <sub>в</sub>
<b>XIII</b> (1,25) 9/5,625	49,9	-129,4 <sup>P</sup>	-1118,0	523	331	261	264 <sup>P</sup>	277 <sup>P</sup>
	50,0	-121,4 <sup>P</sup>	-1110,4	535	330	263	262	301
	49,3 <sup>P</sup>	-116,1	-1098,3 <sup>P</sup>	524 <sup>P</sup>	330 <sup>P</sup>	260 <sup>P</sup>	<b>268</b>	<b>308</b>
	52,6	<b>-114,2</b>	-1098,3	521 <sup>P</sup>	320 <sup>P</sup>	270♦	262*	300*
	<b>48,9</b>	-116,1*	<b>-1056,7</b>	533 <sup>P</sup>	324	263♦		
	50,9*		-1098,3*	524	<b>336</b>	271		
				<b>537</b>	<b>328</b>	270*		
			523*	324*				
<b>XIV</b> (2,25) 18/13,5	45,9	-162,8 <sup>P</sup>	-1707,0	572	369	277	284 <sup>P</sup>	315 <sup>P</sup>
	41,8	-142,0 <sup>P</sup>	-1713,5 <sup>P</sup>	578	370	286	266 <sup>P</sup>	310 <sup>P</sup>
	41,8 <sup>P</sup>	-136,7	-1713,5	570 <sup>P</sup>	368 <sup>P</sup>	277 <sup>P</sup>	284	326
	42,3	<b>-134,9</b>	<b>-1656,3</b>	569 <sup>P</sup>	342 <sup>P</sup>	320♦	<b>291</b>	<b>333</b>
	<b>39,9</b>	-136,8*	-1713,5*	579 <sup>P</sup>	367	284♦	284*	326*
	44,3*			573	<b>378</b>	287		
				<b>588</b>	<b>374</b>	<b>288</b>		
			568*	366*	288*			
<b>XV</b> (3,25) 32/26	36,3 <sup>P</sup>	-162,7 <sup>P</sup>	-2328,6 <sup>P</sup>	612 <sup>P</sup>	407	303	305	348
	35,4 <sup>P</sup>	-157,4	-2328,6	601 <sup>P</sup>	407 <sup>P</sup>	304	<b>313</b>	<b>357</b>
	36,1	<b>-155,6</b>	<b>-2263,4</b>	614	366 <sup>P</sup>	304 <sup>P</sup>	303*	340*
	<b>34,4</b>	-157,4*	-2328,7*	<b>630</b>	403	372♦		
	36,6*			613*	<b>416</b>	305♦		
					<b>409</b>	305		
					403*	294 <sup>#</sup>		
					<b>305</b>			
					304*			
<b>XVI</b> (3,25) 31/25,2	36,3 <sup>P</sup>	-162,7 <sup>P</sup>	-2328,6 <sup>P</sup>	616 <sup>P</sup>	410 <sup>P</sup>	301 <sup>P</sup>	305	348
	35,5 <sup>P</sup>	-157,4	-2328,6	620 <sup>P</sup>	366 <sup>P</sup>	393♦	<b>311</b>	<b>355</b>
	36,1	<b>-154,8</b>	<b>-2238,6</b>	614	403	307♦	303*	340*
	<b>34,0</b>	-157,4*	-2328,7*	<b>626</b>	<b>412</b>	305		
	36,6*			613*	<b>408</b>	297 <sup>#</sup>		
					403*	<b>302</b>		
						304*		
<b>XVII</b> (4,25) 52/44,2	32,0 <sup>P</sup>	-183,3 <sup>P</sup>	-2943,8 <sup>P</sup>	638 <sup>P</sup>	435	318 <sup>P</sup>	324	369
	31,7 <sup>P</sup>	-178,0	-2943,8	621 <sup>P</sup>	435 <sup>P</sup>	429♦	<b>333</b>	<b>379</b>
	31,7	<b>-176,3</b>	<b>-2874,5</b>	648	421 <sup>P</sup>	318♦	324*	370*
	<b>30,6</b>	-178,1*	-2943,8*	<b>661</b>	388 <sup>P</sup>	321		
	32,0*			644*	434	318 <sup>#</sup>		
					<b>447</b>	<b>329</b>		
					<b>439</b>	321*		
				432*				
<b>XVIII</b> (4,25) 50/42,5	32,0 <sup>P</sup>	-183,3 <sup>P</sup>	-2943,8 <sup>P</sup>	648 <sup>P</sup>	442 <sup>P</sup>	318 <sup>P</sup>	324	369
	31,7 <sup>P</sup>	-178,0	-2943,8	639 <sup>P</sup>	432 <sup>P</sup>	457♦	<b>330</b>	<b>376</b>
	31,7	<b>-175,1</b>	<b>-2837,6</b>	648	388 <sup>P</sup>	324♦	324*	370*
	<b>30,2</b>	-178,1*	-2943,8*	<b>657</b>	434	321		
	32,0*			644*	<b>447</b>	324 <sup>#</sup>		
					<b>439</b>	<b>326</b>		
					432*	321*		
<b>XIX</b> (2) 18/12	42,3	-150,8 <sup>P</sup>	-1733,0	559	361	280	278 <sup>P</sup>	309 <sup>P</sup>
	41,8 <sup>P</sup>	-142,0 <sup>P</sup>	-1720,0	557 <sup>P</sup>	358 <sup>P</sup>	294	279	320
	40,0 <sup>P</sup>	-136,7	-1713,5 <sup>P</sup>	560 <sup>P</sup>	361 <sup>P</sup>	280 <sup>P</sup>	<b>291</b>	<b>333</b>
	42,3	<b>-134,9</b>	-1713,5	558 <sup>P</sup>	343 <sup>P</sup>	356♦	278*	319*
	<b>39,9</b>	-136,8*	<b>-1656,3</b>	562	357	277♦		
	44,3*		-1713,5*	<b>588</b>	<b>378</b>	283		
				557*	<b>367</b>	255 <sup>#</sup>		
				353*	<b>274</b>			
					283*			

Номер, (УУЦ), W/W*	P <sub>кр</sub> , атм	Теплота, кДж/моль		Температура, К				
		H <sub>обр</sub>	H <sub>ст</sub>	T <sub>кр</sub>	T <sub>кип</sub>	T <sub>всп</sub>	T <sub>н</sub>	T <sub>в</sub>
<b>XX</b> (3) 31/23,25	36,3	-190,1 <sup>P</sup>	-2311,0	600	397	299	299 <sup>P</sup>	331 <sup>P</sup>
	36,3 <sup>P</sup>	-162,7 <sup>P</sup>	-2328,6 <sup>P</sup>	597 <sup>P</sup>	396 <sup>P</sup>	300	300	343
	35,4 <sup>P</sup>	-157,4	-2328,6	601 <sup>P</sup>	398 <sup>P</sup>	299 <sup>P</sup>	<b>311</b>	<b>355</b>
	36,1	<b>-154,8</b>	<b>-2238,6</b>	605	366 <sup>P</sup>	366♦	299*	343*
	<b>34,0</b>	-157,4*	-2328,7*	<b>625</b>	394	297♦		
	36,6*			602*	<b>412</b>	300		
					<b>403</b>	286 <sup>#</sup>		
				392*	<b>302</b>	300*		
<b>XXI</b> (4) 50/40	32,0 <sup>P</sup>	-183,3 <sup>P</sup>	-2943,8 <sup>P</sup>	619 <sup>P</sup>	423 <sup>P</sup>	316 <sup>P</sup>	320	364
	31,7 <sup>P</sup>	-178,0	-2943,8	621 <sup>P</sup>	421 <sup>P</sup>	420♦	<b>330</b>	<b>376</b>
	31,7	<b>-175,1</b>	<b>-2837,6</b>	640	388 <sup>P</sup>	308♦	320*	366*
	<b>30,2</b>	-178,1*	-2943,8*	<b>681</b>	427	317		
	32,0*			636*	<b>443</b>	307 <sup>#</sup>		
					<b>433</b>	<b>326</b>		
					425*	318*		
<b>XXII</b> (4) 48/38,4	32,0 <sup>P</sup>	-183,3 <sup>P</sup>	-2943,8 <sup>P</sup>	634 <sup>P</sup>	432 <sup>P</sup>	451♦	320	364
	31,7 <sup>P</sup>	-178,0	-2943,8	639 <sup>P</sup>	388 <sup>P</sup>	316♦	<b>327</b>	<b>372</b>
	31,7	<b>-173,8</b>	<b>-2799,7</b>	640	427	317	320*	366*
	<b>29,8</b>	-178,1*	-2943,8*	<b>677</b>	<b>438</b>	316 <sup>#</sup>		
	32,0*			636*	<b>431</b>	<b>322</b>		
					425*	318*		
<b>XXIII</b> (2,75) 32/22	36,3 <sup>P</sup>	-162,7 <sup>P</sup>	-2328,6 <sup>P</sup>	579 <sup>P</sup>	385	292	295	337
	35,4 <sup>P</sup>	-157,4	-2328,6	582 <sup>P</sup>	387 <sup>P</sup>	296 <sup>P</sup>	<b>313</b>	<b>357</b>
	36,1	<b>-155,6</b>	<b>-2263,4</b>	595	385 <sup>P</sup>	396♦	295	338
	<b>34,4</b>	-157,4*	-2328,7*	<b>630</b>	366 <sup>P</sup>	288♦		
	36,6*			593*	385	296		
					<b>416</b>	276 <sup>#</sup>		
					<b>399</b>	<b>305</b>		
				385*	296*			
<b>XXIV</b> (3,75) 50/37,5	32,0 <sup>P</sup>	-183,3 <sup>P</sup>	-2943,8 <sup>P</sup>	619 <sup>P</sup>	422	315	315	359
	31,7 <sup>P</sup>	-178,0	-2943,8	621 <sup>P</sup>	422 <sup>P</sup>	316 <sup>P</sup>	330	376
	31,7	-175,1	-2443,8	632	421 <sup>P</sup>	420♦	315*	361*
	30,2	-178,1*	-2943,8*	<b>657</b>	388 <sup>P</sup>	308♦		
	32,0*			632*	419	313		
					<b>443</b>	307 <sup>#</sup>		
					<b>428</b>	<b>326</b>		
				420*	311*			
<b>XXV</b> (4,75) 75/59,38	28,7 <sup>P</sup>	-203,9 <sup>P</sup>	-3558,9 <sup>P</sup>	642 <sup>P</sup>	448 <sup>P</sup>	330 <sup>P</sup>	333	379
	28,5 <sup>P</sup>	-198,7	-3558,9	640 <sup>P</sup>	442 <sup>P</sup>	485♦	<b>347</b>	<b>393</b>
	28,4	<b>-195,1</b>	<b>-3431,2</b>	662	411 <sup>P</sup>	319♦	333*	378*
	<b>27,2</b>	-198,7*	-3559,0	<b>681</b>	448	330		
	28,5*			659*	<b>467</b>	329 <sup>#</sup>		
					<b>454</b>	<b>343</b>		
					445*	328*		
<b>XXVI</b> (4,75) 72/57	28,7 <sup>P</sup>	-203,9 <sup>P</sup>	-3558,9 <sup>P</sup>	651 <sup>P</sup>	454 <sup>P</sup>	518♦	333	379
	28,5 <sup>P</sup>	-198,7	-3558,9	657 <sup>P</sup>	411 <sup>P</sup>	324♦	<b>344</b>	<b>390</b>
	28,4	<b>-193,6</b>	<b>-3387,0</b>	662	448	330	333*	378*
	<b>26,9</b>	-198,7*	-3559,0	<b>677</b>	<b>463</b>	334 <sup>#</sup>		
	28,5*			659*	<b>453</b>	<b>340</b>		
					445*	328*		
<b>XXVII</b> (1,75) 16/9,33	43,9 <sup>P</sup>	-145,5 <sup>P</sup>	-1713,5 <sup>P</sup>	536 <sup>P</sup>	342	268	273	314
	40,5 <sup>P</sup>	-136,7	-1713,5	510 <sup>P</sup>	345 <sup>P</sup>	268 <sup>P</sup>	<b>281</b>	<b>323</b>
	42,3	<b>-132,4</b>	<b>-1583,5</b>	550	340 <sup>P</sup>	358♦	273*	313*
	<b>37,6</b>	-136,8*	-1713,5*	<b>568</b>	346	263♦		
	44,3*			549*	<b>361</b>	280		
					<b>354</b>	239 <sup>#</sup>		
					346*	<b>259</b>		
					281*			



Номер, (УУЦ), W/W*	P <sub>кр</sub> , атм	Теплота, кДж/моль		Температура, К				
		H <sub>обр</sub>	H <sub>ст</sub>	T <sub>кр</sub>	T <sub>кип</sub>	T <sub>всп</sub>	T <sub>н</sub>	T <sub>в</sub>
<b>XXVIII</b> (2,75) 29/19,94	36,9	-192,6 <sup>P</sup>	-2311,0 <sup>P</sup>	599	393	291	295 <sup>P</sup>	327 <sup>P</sup>
	37,0 <sup>P</sup>	-167,9 <sup>P</sup>	-2328,6 <sup>P</sup>	597 <sup>P</sup>	398	300	295	337
	35,8 <sup>P</sup>	-157,4	-2328,6	593 <sup>P</sup>	384 <sup>P</sup>	291 <sup>P</sup>	<b>306</b>	<b>349</b>
	36,1	<b>-153,0</b>	<b>-2187,1</b>	565 <sup>P</sup>	365 <sup>P</sup>	363♦	294*	337*
	<b>33,1</b>	-157,4*	-2328,7*	595	385	294♦		
	36,6*			<b>616</b>	<b>403</b>	296		
			591*	<b>394</b>	283 <sup>#</sup>			
				382*	<b>295</b>			
					296*			
<b>XXIX</b> (3,75) 48/36	32,6 <sup>P</sup>	-188,6 <sup>P</sup>	-2943,8 <sup>P</sup>	618 <sup>P</sup>	418	310 <sup>P</sup>	315	359
	32,0 <sup>P</sup>	-178,0	-2943,8	588 <sup>P</sup>	422 <sup>P</sup>	418♦	<b>327</b>	<b>372</b>
	31,7	<b>-173,8</b>	<b>-2799,7</b>	632	387 <sup>P</sup>	305♦	315*	361*
	<b>29,8</b>	-178,1*	-2943,8*	<b>652</b>	419	313		
	32,0*			632*	<b>438</b>	304 <sup>#</sup>		
					<b>427</b>	<b>322</b>		
				420*	311*			
<b>XXX</b> (2,5) 28/17,5	37,8 <sup>P</sup>	-166,1 <sup>P</sup>	-2328,6 <sup>P</sup>	572 <sup>P</sup>	375	288	290	332
	35,9 <sup>P</sup>	-157,4	-2328,6	537 <sup>P</sup>	375 <sup>P</sup>	289 <sup>P</sup>	<b>303</b>	<b>346</b>
	36,1	<b>-152,1</b>	<b>-2160,3</b>	584	363 <sup>P</sup>	389♦	289*	332*
	<b>32,7</b>	-157,4*	-2328,7*	<b>611</b>	376	280♦		
	36,6*			583*	<b>399</b>	292		
					<b>387</b>	267 <sup>#</sup>		
				376*	<b>292</b>			
					293*			
<b>XXXI</b> (3,5) 46/32,2	32,6 <sup>P</sup>	-188,6 <sup>P</sup>	-2943,8 <sup>P</sup>	609 <sup>P</sup>	412	309 <sup>P</sup>	310	354
	32,0 <sup>P</sup>	-178,0	-2943,8	588 <sup>P</sup>	411 <sup>P</sup>	414♦	<b>324</b>	<b>369</b>
	31,7	<b>-172,5</b>	<b>-2760,5</b>	623	388 <sup>P</sup>	300♦	310*	355*
	<b>29,4</b>	-178,1*	-2943,8*	<b>647</b>	411	309		
	32,0*			618*	<b>433</b>	299 <sup>#</sup>		
					<b>420</b>	<b>318</b>		
				409*	307*			
<b>XXXII</b> (3,25) 46/29,9	33,3 <sup>P</sup>	-186,8 <sup>P</sup>	-2943,8 <sup>P</sup>	597 <sup>P</sup>	402	305 <sup>P</sup>	305	348
	32,1 <sup>P</sup>	-178,0	-2943,8	561 <sup>P</sup>	403 <sup>P</sup>	431♦	<b>324</b>	<b>369</b>
	31,7	<b>-172,5</b>	<b>-2760,5</b>	614	386 <sup>P</sup>	292♦	305*	350*
	<b>29,4</b>	-178,1*	-2943,8*	<b>647</b>	403	305		
	32,0*			613*	<b>433</b>	290 <sup>#</sup>		
					<b>415</b>	<b>318</b>		
				403*	303*			
<b>XXXIII</b> (3,25) 44/28,6	33,3 <sup>P</sup>	-186,8 <sup>P</sup>	-2943,8 <sup>P</sup>	602 <sup>P</sup>	405	305 <sup>P</sup>	305	348
	32,1 <sup>P</sup>	-178,0	-2943,8	561 <sup>P</sup>	403 <sup>P</sup>	433♦	<b>321</b>	<b>365</b>
	31,7	<b>-171,1</b>	<b>-2720,1</b>	614	386 <sup>P</sup>	294♦	305*	350*
	<b>29,0</b>	-178,1*	-2943,8*	<b>642</b>	403	305		
	32,0*			613*	<b>428</b>	293 <sup>#</sup>		
					<b>413</b>	<b>314</b>		
				403*	303*			
<b>XXXIV</b> (3,25) 42/27,3	33,8 <sup>P</sup>	-192,0 <sup>P</sup>	-3558,9 <sup>P</sup>	612 <sup>P</sup>	407 <sup>P</sup>	303 <sup>P</sup>	305	348
	32,4 <sup>P</sup>	-178,0	-3558,9	564 <sup>P</sup>	385 <sup>P</sup>	434♦	<b>317</b>	<b>361</b>
	28,1	<b>-169,7</b>	<b>-3294,3</b>	614	403	287♦	305*	350*
	<b>28,5</b>	-198,7*	-3559,0*	<b>636</b>	<b>422</b>	305		
	28,5*			613*	<b>411</b>	294 <sup>#</sup>		
					403*	<b>310</b>		
					303*			
<b>XXXV</b> (5,75) 127/91,28	21,5 <sup>P</sup>	-257,4 <sup>P</sup>	-4789,3 <sup>P</sup>	662 <sup>P</sup>	467 <sup>P</sup>	341 <sup>P</sup>	350	397
	24,2 <sup>P</sup>	-239,9	-4789,3	607 <sup>P</sup>	451 <sup>P</sup>	546♦	<b>364</b>	<b>412</b>
	23,5	<b>-228,1</b>	<b>-4418,9</b>	686	473	316♦	351*	395*
	<b>22,0</b>	240,0*	-4789,3*	<b>703</b>	<b>492</b>	346		
	23,6*			686*	<b>478</b>	345 <sup>#</sup>		
					472*	<b>361</b>		
					346*			

Номер, (УУЦ), <i>W/W*</i>	$P_{кр}$ , атм	Теплота, кДж/моль		Температура, К				
		$H_{обр}$	$H_{ст}$	$T_{кр}$	$T_{кип}$	$T_{всп}$	$T_{н}$	$T_{в}$
<b>XXXVI</b> (3,75) 66/41,26	30,1 <sup>P</sup>	-183,3 <sup>P</sup>	-3558,9 <sup>P</sup>	600 <sup>P</sup>	420	310	315	359
	29,1 <sup>P</sup>	-198,7	-3558,9	605 <sup>P</sup>	419 <sup>P</sup>	314 <sup>P</sup>	337	383
	28,1	<b>-190,5</b>	<b>-3294,3</b>	632	408 <sup>P</sup>	554 <sup>♦</sup>	315*	361*
	<b>26,3</b>	-198,7*	-3559,0*	<b>668</b>	419	297 <sup>♦</sup>		
	28,5*			632*	<b>453</b>	313		
					<b>432</b>	305 <sup>#</sup>		
				420*	<b>333</b>	311*		
<b>XXXVII</b> (5,25) 136/79,33	24,2 <sup>P</sup>	-286,8 <sup>P</sup>	-5404,4 <sup>P</sup>	664 <sup>P</sup>	464 <sup>P</sup>	340 <sup>P</sup>	342	388
	22,4 <sup>P</sup>	-260,6	-5404,4	609 <sup>P</sup>	471 <sup>P</sup>	612 <sup>♦</sup>	<b>360</b>	<b>408</b>
	21,5	<b>-236,6</b>	<b>-4675,7</b>	675	461	305 <sup>♦</sup>	344*	390*
	<b>19,1</b>	-260,6*	-5404,5*	<b>698</b>	<b>487</b>	338		
	21,7*			674*	<b>470</b>	343 <sup>#</sup>		
					461*	<b>357</b>		
					339*			

## Примечания:

 1.  $W^* = УУЦ \cdot W/N_C$ .

2. Жирным шрифтом выделены данные, рассчитанные по уравнениям (14)–(21).

3. Остальные обозначения см. в примечаниях к табл. 1.

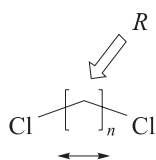


Рис. 1. Способы удлинения углеродной цепи в дихлоралканах

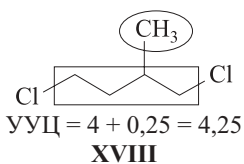
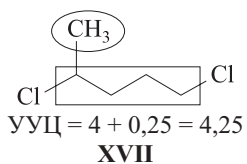
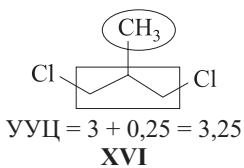
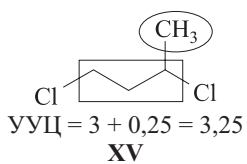
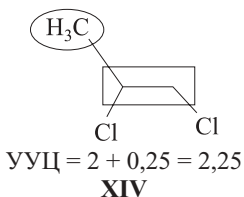
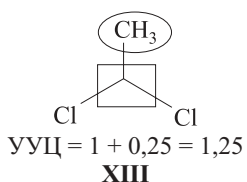


Рис. 2. Определение УУЦ в соединениях (XIII)–(XVIII)

вычисления температуры вспышки по модифицированному уравнению Орманди – Крэвэна (22).

Установлено, что прогноз по программному комплексу ChemBioOffice 2012 в большинстве случаев дает заниженные расчетные значения температуры кипения дихлоралканов. Уравнение (2) из национального стандарта [34] неприменимо для определения температуры вспышки дихлоралканов изо-

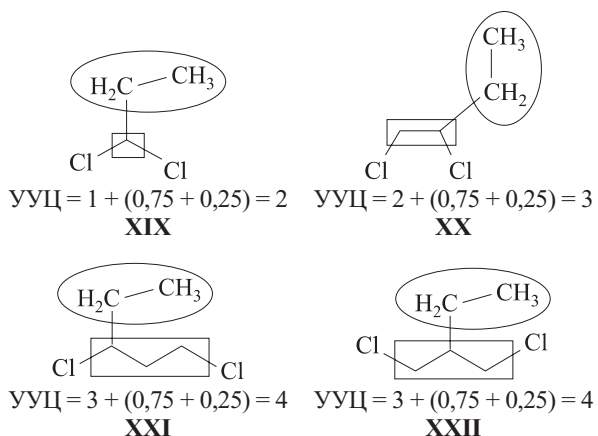


Рис. 3. Определение УУЦ в соединениях (XIX)–(XXII)

мерного строения. Формулы (14)–(21), в которых в качестве одного из дескрипторов используются индексы Винера  $W$  и  $W^*$ , а также уравнение (3) из ГОСТ 12.1.044–89\* [34] по точности прогнозирования физико-химических и пожароопасных характеристик соединений (XXIII)–(XXXVII) уступают уравнениям (6)–(13) и правилу углеродной цепи.

В заключение можно отметить, что в результате проведенного исследования сделан прогноз ранее неизвестных физико-химических и пожароопасных свойств дихлоралканов различными расчетными методами. Выявлены ограничения применимости формул ГОСТ 12.1.044–89\* для расчета температуры вспышки в закрытом тигле органических соединений данного класса. Предложены новые эмпирические уравнения для расчета критического давления и критической температуры, теплот образования и

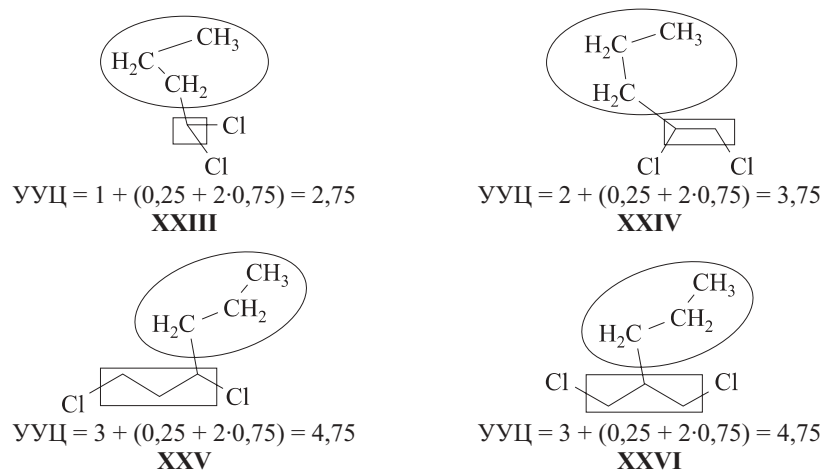


Рис. 4. Определение УУЦ в соединениях (XXIII)–(XXVI)

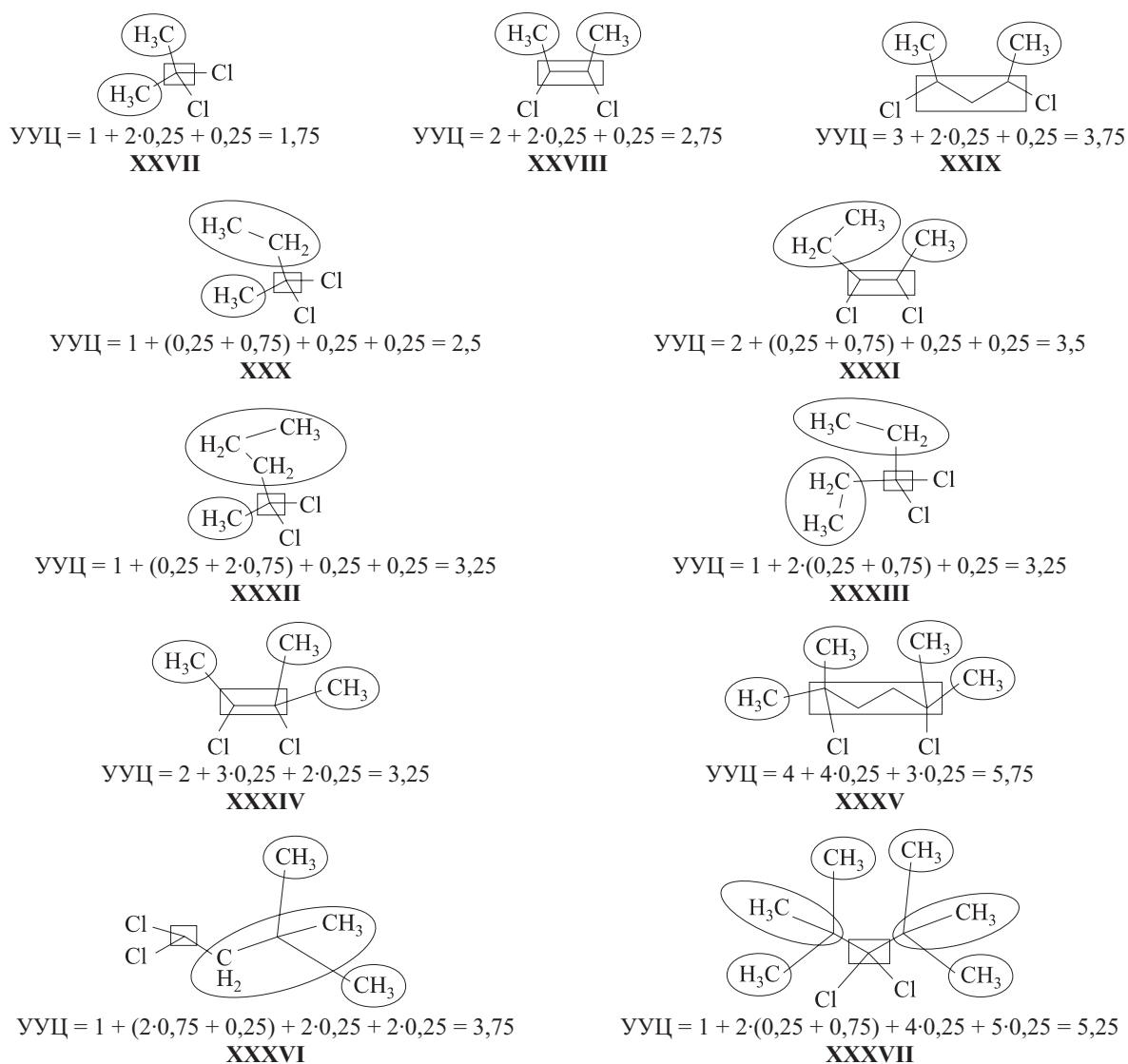


Рис. 5. Определение УУЦ в соединениях (XXVII)–(XXXVII)

сгорания, температур кипения и вспышки для дихлоралканов нормального и изомерного строения. Показана применимость правила углеродной цепи

и действие свойства функциональной группы для предсказания различных физико-химических и пожароопасных показателей в ряду дихлоралканов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vidal M., Rogers W. J., Holste J. C., Mannan M. S. A review of estimation methods for flash points and flammability limits // *Process Safety Progress*. — 2004. — Vol. 23, No. 1. — P. 47–55. doi: 10.1002/prs.10004.
2. Liu X., Liu Z. Research progress on flash point prediction // *Journal of Chemical & Engineering Data*. — 2010. — Vol. 55, No. 9. — P. 2943–2950. doi: 10.1021/jc1003143.
3. Catoire L., Naudet V. A unique equation to estimate flash points of selected pure liquids and application to the correction of probably erroneous flash point values // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. — 2004. — Vol. 33, No. 4. — P. 1083–1111. doi: 10.1063/1.1835321.
4. Рудаков О. Б., Калач А. В., Черепяхин А. М., Исаев А. А. Пожарная опасность бинарных органических растворителей для жидкостной хроматографии // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2011. — Т. 20, № 8. — С. 9–11.
5. Рудаков О. Б., Черепяхин А. М., Исаев А. А., Рудакова Л. В., Калач А. В. Температура вспышки бинарных растворителей для жидкостной хроматографии // *Конденсированные среды и межфазные границы*. — 2011. — Т. 13, № 2. — С. 191–195.
6. Калач А. В., Карташова Т. В., Сорокина Ю. Н., Облиенко М. В. Прогнозирование пожароопасных свойств органических соединений с применением дескрипторов // *Пожарная безопасность*. — 2013. — № 1. — С. 70–73.
7. Калач А. В., Сорокина Ю. Н., Карташова Т. В., Спичкин Ю. В. Оценка пожароопасных свойств органических соединений с применением дескрипторов // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2013. — Т. 22, № 1. — С. 18–22.
8. Калач А. В., Карташова Т. В., Сорокина Ю. Н. Применение дескрипторов при прогнозировании пожароопасных свойств фармацевтических препаратов // *Пожарная безопасность*. — 2013. — № 3. — С. 105–108.
9. Калач А. В., Сорокина Ю. Н., Карташова Т. В., Спичкин Ю. В. Применение метода расчета дескрипторов при прогнозировании температуры вспышки органических соединений // *Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура*. — 2012. — № 4 (28). — С. 136–141.
10. Сорокина Ю. Н., Черникова Т. В., Калач А. В., Калач Е. В., Пищальников А. В. Влияние структуры молекулы на показатели пожароопасности азотсодержащих органических веществ // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2013. — Т. 22, № 11. — С. 12–16.
11. Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Алексеев К. С., Орлов С. А. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. I. Алканолаы // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2010. — Т. 19, № 5. — С. 23–30.
12. Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Алексеев К. С., Орлов С. А. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. II. Кетоны (часть 1) // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2011. — Т. 20, № 6. — С. 8–15.
13. Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Алексеев К. С., Орлов С. А. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. III. Кетоны (часть 2) // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2011. — Т. 20, № 7. — С. 8–13.
14. Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Алексеев К. С., Орлов С. А. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. IV. Простые эфиры // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2011. — Т. 20, № 9. — С. 9–16.
15. Алексеев К. С., Барбин Н. М., Алексеев С. Г. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. V. Карбоновые кислоты // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2012. — Т. 21, № 7. — С. 35–46.
16. Алексеев К. С., Барбин Н. М., Алексеев С. Г. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. VI. Альдегиды // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2012. — Т. 21, № 9. — С. 29–37.
17. Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Смирнов В. В. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. VII. Нитроалканы // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2012. — Т. 21, № 12. — С. 22–24.
18. Алексеев С. Г., Алексеев К. С., Барбин Н. М. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. VIII. Сложные эфиры (часть 1) // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2013. — Т. 22, № 1. — С. 31–57.
19. Смирнов В. В., Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Животинская Л. О. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. IX. Хлоралканы // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2013. — Т. 22, № 4. — С. 13–21.

20. Алексеев С. Г., Алексеев К. С., Животинская Л. О., Барбин Н. М. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. X. Сложные эфиры (часть 2) // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 5. — С. 9–19.
21. Смирнов В. В., Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Калач А. В. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XI. Галогеналканы // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 8. — С. 25–37.
22. Алексеев С. Г., Мавлютова Л. К., Алексеев К. С., Барбин Н. М. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XII. Алкилбензолы и диалкилбензолы // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 6. — С. 38–46.
23. Смирнов В. В., Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Животинская Л. О. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XIII. Тиоспирты // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 8. — С. 15–25.
24. Смирнов В. В., Алексеев С. Г., Барбин Н. М. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XIV. Алкиламины // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 9. — С. 27–37.
25. Смирнов В. В., Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Животинская Л. О. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XV. Тиозэфиры // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 11. — С. 24–33.
26. Алексеев С. Г., Кошелев А. Ю., Барбин Н. М. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XVI.  $\alpha, \omega$ -Аминоспирты // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 12. — С. 13–19.
27. База данных DIPPR 801 [Электронный ресурс]. URL : <http://dippr.byu.edu/public> (дата обращения: 25–30.12.2013 г.).
28. Сайт компании Sigma-Aldrich. URL : <http://www.sigmaaldrich.com/catalog> (дата обращения: 25.12.2013 г.).
29. База данных университета Akron. URL : <http://ull.chemistry.uakron.edu/erd> (дата обращения: 25.12.2013 г.).
30. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник: в 2 ч. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. 1. — 713 с.
31. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник: в 2 ч. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. 2. — 774 с.
32. База данных “ChemSpider”. URL : <http://www.chemspider.com> (дата обращения: 25–27.12.2013 г.).
33. Монахов В. Т. Показатели пожарной опасности веществ и материалов. Анализ и предсказание. Газы и жидкости. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. — 248 с.
34. ГОСТ 12.1.044–89\*. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. Доступ из сборника НСИС ПБ. — 2012. — № 2 (48).
35. Dykx J., Svoboda J., Wilhoit R. C., Frenkel M., Hall K. R. Vapor pressure and Antoine constants for hydrocarbons, and sulfur, selenium, tellurium, and halogen containing organic compounds. — Berlin : Springer-Verlag, 1999. — 274 p.
36. Алексеев С. Г., Смирнов В. В., Алексеев К. С., Барбин Н. М. Температура вспышки. Часть III. Методы расчета через температуру кипения // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 3. — С. 30–43.

Материал поступил в редакцию 14 февраля 2014 г.

English

## CORRELATION OF FIRE HAZARD CHARACTERISTICS WITH CHEMICAL STRUCTURE. XVII. DICHLOROALKANES

**ALEXEEV S. G.**, Candidate of Chemistry Sciences, Associate Professor, Corresponding Member of WASCs, Senior Researcher of Science and Engineering Centre “Reliability and Safety of Large Systems” of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Studencheskaya St., 54a, Yekaterinburg, 620049, Russian Federation); Senior Researcher of Ural State Fire Service Institute of Emercom of Russia (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; e-mail address: Alexshome@mail.ru)

**MAVLYUTOVA L. K.**, Postgraduate Student of Science and Engineering Centre “Reliability and Safety of Large Systems” of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; e-mail address: mavly-lilya@mail.ru)

**KOSHELEV A. Yu.**, Senior Lecturer of Ural State Fire Service Institute of Emercom of Russia (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation); Postgraduate Student of Science and Engineering Centre "Reliability and Safety of Large Systems" of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; e-mail address: Alekshelev@mail.ru)

**BARBIN N. M.**, Doctor of Technical Sciences, Candidate of Chemistry Sciences, Head of Chemistry Department, Ural State Agrarian University (Karla Libknekhta St., 42, Yekaterinburg, 620075, Russian Federation); Senior Researcher, Ural State Fire Service Institute of Emercom of Russia (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; e-mail address: NMBarbin@mail.ru)

## ABSTRACT

The correlation of chemical structure and fire properties is studied in number of dichloroalkanes. It is shown, that for these compounds the carbon rule which allows to predict their physicochemical and fire properties well works. Empirical equations of calculation are offered for critical pressure ( $P_c$  (atm) =  $-47,739 \ln(N_C)^{0.5} + 92,31$ ), heat of formation ( $H_f$  (kJ/mole) =  $-(20,639N_C + 74,83)$ ), heat of combustion ( $H_c$  (kJ/mole) =  $-(615,16N_C - 132,02)$ ), critical temperature ( $T_c$  (K) =  $0,155 N_C^3 - 5,222 N_C^2 + 66,062N_C + 449,3$ ), boiling point ( $BP$  (K) =  $0,105 N_C^3 - 3,588 N_C^2 + 53,726N_C + 262,6$ ), flash point ( $FP$  (K) =  $16,663N_C + 250,5$ ,  $FP$  (°C) =  $0,848t_b - 92,2$ ), lower and upper flammability limit temperatures ( $LFLT$  (K) =  $0,822 N_C^2 + 25,35N_C + 231,5$ ,  $UFLT$  (K) =  $-1,086LFLT$  (K) + 16,9).  $N_C$  is number of carbon atoms for normal dichloroalkanes, and it is the conditional carbon chain for isomeric compounds. Earlier unknown physicochemical and fire-dangerous properties are defined for some dichloroalkanes.

**Keywords:** dichloroalkane; flash point; dependence; prediction; chemoinformatics.

## REFERENCES

1. Vidal M., Rogers W. J., Holste J. C., Mannan M. S. A review of estimation methods for flash points and flammability limits. *Process Safety Progress*, 2004, vol. 23, no. 1, pp. 47–55. doi: 10.1002/prs.10004.
2. Liu X., Liu Z. Research progress on flash point prediction. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2010, vol. 55, no. 9, pp. 2943–2950. doi: 10.1021/je1003143.
3. Catoire L., Naudet V. A unique equation to estimate flash points of selected pure liquids and application to the correction of probably erroneous flash point values. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2004, vol. 33, no. 4, pp. 1083–1111. doi: 10.1063/1.1835321.
4. Rudakov O. B., Kalach A. V., Cherepakhin A. M., Isaev A. A. Pozharnaya opasnost binarnykh organicheskikh rastvoriteley dlya zhidkostnoy khromatografii [Fire danger of binary organic solvents for a liquid chromatography]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 8, pp. 9–11.
5. Rudakov O. B., Cherepakhin A. M., Isaev A. A., Rudakova L. V., Kalach A. V. Temperatura vspyshki binarnykh rastvoriteley dlya zhidkostnoy khromatografii [Flash point of binary solvents for a liquid chromatography]. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy — Condensed Matter and Interphases*, 2011, vol. 13, no. 2, pp. 191–195.
6. Kalach A. V., Kartashova T. V., Sorokina Yu. N., Oblienko M. V. Prognozirovaniye pozharoopasnykh svoystv organicheskikh soyedineniy s primeneniyyem deskriptorov [Prediction fire-dangerous properties of organic compounds using descriptors]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2013, no. 1, pp. 70–73.
7. Kalach A. V., Sorokina Yu. N., Kartashova T. V., Spichkin Yu. V. Otsenka pozharoopasnykh svoystv organicheskikh soyedineniy s primeneniyyem deskriptorov [Estimation of fire-dangerous properties of organic compounds using descriptors]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 18–22.
8. Kalach A. V., Kartashova T. V., Sorokina Yu. N. Primeneniye deskriptorov pri prognozirovanii pozharoopasnykh svoystv farmatsevticheskikh preparatov [Application descriptors in predicting fire-dangerous properties of pharmaceuticals]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2013, no. 3, pp. 105–108.
9. Kalach A. V., Sorokina Yu. N., Kartashova T. V., Spichkin Yu. V. Primeneniye metoda rascheta deskriptorov pri prognozirovanii temperatury vspyshki organicheskikh soyedineniy [Application of the method of calculation of descriptors in predicting flash point of organic compounds]. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitelstvo i arkhitektura — The Scientific Herald of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2012, no. 4 (28), pp. 136–141.

10. Sorokina Yu. N., Chernikova T. V., Kalach A. V., Kalach E. V., Pishchalnikov A. V. Vliyaniye struktury molekuly na pokazateli pozharoopasnosti azotsoderzhashchikh organicheskikh veshchestv [Influence of molecular structure on fire-dangerous properties of nitrogen-containing organic substances]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 11, pp. 12–16.
11. Alexeev S. G., Barbin N. M., Alexeev K. S., Orlov S. A. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. I. Alkanoly [Correlation of fire hazard indices with chemical structure. I. Alcohols]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 5, pp. 23–30.
12. Alexeev S. G., Barbin N. M., Alexeev K. S., Orlov S. A. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. II. Ketony (chast 1) [Correlation of fire hazard indices with chemical structure. II. Ketones (part 1)]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 6, pp. 8–15.
13. Alexeev S. G., Barbin N. M., Alexeev K. S., Orlov S. A. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. III. Ketony [Correlation of fire hazard indices with chemical structure. III. Ketones (part 2)]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 7, pp. 8–13.
14. Alexeev S. G., Barbin N. M., Alexeev K. S., Orlov S. A. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. IV. Prostyie efiry [Correlation of fire hazard indices with chemical structure. IV. Ethers]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 9–16.
15. Alexeev K. S., Barbin N. M., Alexeev S. G. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. V. Karbovyye kisloty [Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. V. Carboxylic acids]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 7, pp. 35–46.
16. Alexeev K. S., Barbin N. M., Alexeev S. G. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. VI. Aldehydy [Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. VI. Aldehydes]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 9, pp. 29–37.
17. Alexeev S. G., Barbin N. M., Smirnov V. V. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. VII. Nitroalkany [Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. VII. Nitroalkanes]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 12, pp. 22–24.
18. Alexeev S. G., Alexeev K. S., Barbin N. M. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. VIII. Slozhnyie efiry (chast 1) [Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. VIII. Esters (part 1)]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 22, no. 1, pp. 31–57.
19. Smirnov V. V., Alexeev S. G., Barbin N. M., Zhivotinskaya L. O. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. IX. Khlorkany [Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. IX. Chloroalkanes (part 2)]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 22, no. 4, pp. 13–21.
20. Alexeev S. G., Alexeev K. S., Zhivotinskaya L. O., Barbin N. M. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. X. Slozhnyie efiry (chast 2) [Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. X. Esters (part 2)]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 22, no. 5, pp. 9–19.
21. Smirnov V. V., Alexeev S. G., Barbin N. M., Kalach A. V. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. XI. Galogenalkany [Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. XI. Haloalkanes]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 8, pp. 25–37.
22. Alexeev S. G., Mavlyutova L. K., Alexeev K. S., Barbin N. M. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. XII. Alkilbenzoly i dialkilbenzoly [Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. XII. Alkyl benzenes and dialkyl benzenes]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 38–46.
23. Smirnov V. V., Alexeev S. G., Barbin N. M., Zhivotinskaya L. O. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. XIII. Tiospirty [Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. XIII. Alkylthiols]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 8, pp. 15–25.
24. Smirnov V. V., Alexeev S. G., Barbin N. M. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. XIV. Alkilaminy [Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. XIV. Alkylamines]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 9, pp. 27–37.
25. Smirnov V. V., Alexeev S. G., Barbin N. M., Zhivotinskaya L. O. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroyeniym. XV. Tioefiry [Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. XV. Thioethers]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 11, pp. 24–33.

26. Alexeev S. G., Koshelev A. Yu., Barbin N. M. Svyaz pokazateley pozharnoy opasnosti s khimicheskim stroeniyem. XVI.  $\alpha, \omega$ -Aminospiyty [*Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. XVI.  $\alpha, \omega$ -Aminoalcohols*]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 12, pp. 13–19.
27. Chemical Database DIPPR 801. Available at: <http://www.aiche.org/dippr> (Accessed 10 October – 19 November 2013).
28. Sigma-Aldrich database. Available at: <http://www.sigma-aldrich.com/catalog> (Accessed 15 November 2013).
29. Akron University database. Available at: <http://ull.chemistry.uakron.edu/erd> (Accessed 14 November 2013).
30. Korol'chenko A. Ya., Korol'chenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik* [Fire and explosive hazard of compounds and materials, and their fire extinguishing means. Handbook]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004, vol. 1. 713 p.
31. Korol'chenko A. Ya., Korol'chenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik* [Fire and explosive hazard of compounds and materials, and their fire extinguishing means. Handbook]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004, vol. 2. 774 p.
32. ChemSpider database. Available at: <http://www.chemspider.com> (Accessed 1–10 October 2013).
33. Monakhov V. T. *Pokazateli pozharnoy opasnosti veshchestv i materialov. Analiz i predskazaniye. Gazy i zhidkosti* [Fire hazard indices of compounds and substances. Analysis and prediction. Gases and liquids]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2007, p. 102.
34. Interstate Standard 12.1.044–89\*. Occupational Safety Standards System. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1989; IPK Izdatelstvo standartov, 1996, 2001. Available at: NSIS PB, 2012, no. 2 (48) (in Russian).
35. Dykyj J., Svoboda J., Wilhoit R. C., Frenkel M., Hall K. R. *Vapor pressure and Antoine constants for hydrocarbons, and sulfur, selenium, tellurium, and halogen containing organic compounds*. Berlin, Springer-Verlag, 1999. 274 p.
36. Alexeev S. G., Smirnov V. V., Alexeev K. S., Barbin N. M. Temperatura vspyshki. Chast III. Metody rascheta cherez temperaturu kipeniya [Flash point. Part III. Calculation via a boiling temperature]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 30–43.



## Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу

**А. А. Антоненко, Т. А. Буцынская, А. Н. Членов.**  
**ОСНОВЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**  
**БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ : учебно-справочное пособие**  
 / Под общ. ред. д-ра техн. наук А. Н. Членова. —  
 М. : ООО «Издательство «Пожнаука», 2010. — 210 с.



В учебно-справочном пособии изложены основы современного подхода к проблеме комплексного обеспечения безопасности объектов хозяйствования с помощью технических средств и систем; приведены сведения о технической эксплуатации комплексных систем безопасности, а также справочно-методическая информация для решения практических задач по эксплуатации. Дано основное содержание эксклюзивной разработки — ГОСТ Р 53704–2009 «Системы безопасности комплексные и интегрированные», входящего в отраслевой комплект нормативно-технической документации по данной проблеме.

Книга предназначена для практических работников в области систем безопасности и может быть использована как учебное пособие для подготовки и повышения квалификации специалистов соответствующего профиля.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: [mail@firepress.ru](mailto:mail@firepress.ru)



**С. Л. БАРБОТЬКО**, канд. техн. наук, начальник лаборатории "Исследование неметаллических материалов на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность", ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ)", ГНЦ РФ (Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, 17; e-mail: slbarbotko@yandex.ru)

**О. С. ВОЛЬНЫЙ**, ведущий инженер лаборатории "Исследование неметаллических материалов на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность", ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ)", ГНЦ РФ (Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, 17)

**О. А. КИРИЕНКО**, канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории "Исследование неметаллических материалов на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность", ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ)", ГНЦ РФ (Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, 17)

**Е. Н. ШУРКОВА**, инженер 2-й категории лаборатории "Исследование неметаллических материалов на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность", ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ)", ГНЦ РФ (Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, 17)

УДК 614.841.345:629.7.042.2

## ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЖАРООПАСНОСТЬ.

### Часть 1. Испытания на горючесть. Влияние толщины образца на регистрируемые характеристики

Показано, что согласно требованиям авиационных норм испытаниям по определению характеристик воспламеняемости под воздействием открытого пламени (горючести) подлежат образцы материалов всех используемых толщин. С целью уменьшения объема испытаний зарубежными исследователями принято положение, что результаты испытаний наиболее тонкого образца являются доказательными для более толстого. Проведены исследования по влиянию толщины образцов полимерных композиционных материалов и трехслойных сотовых панелей на их основе на характеристики горючести (длина прогорания, продолжительность остаточного самостоятельного горения) согласно требованиям авиационных норм. Проанализированы данные по характеристикам горючести полимерных материалов авиационного назначения разных типов (стекло-, органо- и углепластики, трехслойные сотовые панели) с различной толщиной образцов. Установлено, что принятое допущение выполняется для длины прогорания, но не всегда действует для продолжительности остаточного горения. Предложено при выполнении квалификационных испытаний по оценке горючести использовать стандартный ряд толщин образцов, аналогичный применяемому при определении характеристик дымообразования и тепловыделения.

**Ключевые слова:** горючесть; остаточное горение; длина прогорания; полимерный композиционный материал; сотовая панель; толщина образца.

#### Введение

С развитием науки и совершенствованием технологий идет постоянная разработка новых материалов, способных обеспечить комфорт и безопасность авиапассажира на новом уровне.

Первой и одной из основных характеристик, определяющих безопасность материала и допустимость его применения в отделке авиационной техники, является показатель горючести. Данное требование было введено в зарубежные и отечественные авиационные нормы в конце 60-х – начале 70-х годов XX века [1, 2]. С тех пор методики проведения

испытаний постоянно совершенствовались, менялись и объекты испытаний [1, 3–5].

Исторически самые первые методы оценки пожарной безопасности были регламентированы стандартами по определению характеристик горючести. В зависимости от функционального назначения и геометрического размера изделий, используемых в отделке интерьера пассажирского салона, а также вида авиационной техники к материалам предъявляются различные требования по допустимым значениям показателя горючести и используются разные методы их испытания. Подавляющее большин-

ство материалов для отделки пассажирского салона, багажно-грузовых отсеков, кабины пилотов, санузлов, кухонь и т. п. должно удовлетворять требованиям по характеристикам, определяемым методом вертикального испытания (Авиационные правила АП-25, приложение F, ч. I, пп. (a)(1)(i) и (a)(1)(ii)) [6].

Особенностям наиболее широко применяемого метода оценки пожарной опасности полимерных материалов и конструктивных образцов авиационного назначения — метода оценки горючести уделяется постоянное внимание. Совершенствование процедуры проведения испытаний предусмотрено в программах деятельности Международной рабочей группы по пожарной безопасности авиационных материалов (*International Aircraft Materials Fire Test Working Group (IAMFT WG)*), осуществляющей свою деятельность под управлением Федерального авиационного агентства (FAA) США [7–11].

Одним из важнейших вопросов при проведении квалификационных испытаний материалов авиационного назначения является требуемый объем проводимых работ и выбор методики испытаний. Количество испытаний определяется в первую очередь необходимой выборкой проверяемых толщин образцов материалов. Выбор методики испытаний определяется функциональным назначением материала и местом расположения деталей или конструкций из данного материала.

Для допуска материала к использованию должны быть проведены испытания выполненных из него образцов, имеющих такую же толщину, какая будет применяться в изделии. Однако зачастую элементы имеют сложную форму переменного сечения; из одного и того же материала могут изготавливаться элементы различной толщины. Согласно существующим на настоящий момент требованиям авиационных норм [6] должны быть испытаны образцы всего ряда возможных толщин, даже если отличие между ними составляет доли миллиметра. Это приводит к проблемам оценки допустимости применения материала в конструкции на основе имеющихся данных и зачастую к излишнему увеличению объемов испытаний.

Для сокращения объема испытаний на горючесть зарубежными исследователями принято следующее положение: “*Data from testing a thinner construction substantiates a thicker construction made of the same materials*”, т. е. “*данные от тестирования более тонкого образца доказывают пригодность более толстого образца, изготовленного из тех же самых материалов*” [11]. Таким образом, для допуска материала к использованию по характеристикам горючести необходимо, чтобы самый тонкий материал соответствовал требованиям по максималь-

ной продолжительности остаточного горения и длине прогорания.

В работе [12] показано, что при испытаниях на тепловыделение согласно требованиям [6] зависимость характеристик тепловыделения от толщины материала имеют нелинейный вид с экстремумом, т. е. существует некоторая критическая толщина, обладающая наихудшими показателями. Аналогичное нелинейное изменение характеристик образцов материалов с увеличением толщины может иметь место и для показателей горючести и дымообразования.

Вопросы по методике проведения испытаний материалов авиационного назначения для обеспечения легитимного допуска материалов всех используемых толщин и различного функционального назначения планируется рассмотреть в цикле статей, посвященных исследованию влияния толщины на характеристики горючести и дымообразования, влияния продолжительности экспозиции пламенем горелки на показатели горючести.

Целью настоящей работы являлось: определить легитимность использования принятого в [11] положения.

Для этого решались следующие задачи:

- на конкретных примерах оценить изменение характеристик горючести (продолжительность остаточного самостоятельного горения и длина прогорания) у полимерных композиционных материалов (ПКМ) различных классов (стекло-, угле- и органопластики), изготовленных на различных типах полимерного связующего, и трехслойных сотовых панелей при различной толщине образцов при проведении стандартных квалификационных испытаний на горючесть [6];
- определить наихудшие (наиболее опасные) толщины для различных характеристик горючести при разных условиях экспонирования;
- выбрать предпочтительный ряд толщин образцов для проведения испытаний на горючесть полимерных материалов авиационного назначения.

### Образцы и материалы для исследований

В ВИАМ на основе результатов непосредственно проведенных испытаний, а также анализа зарубежной информации накоплен большой банк данных по характеристикам пожароопасности материалов и типовых конструктивных элементов авиационного назначения и издан справочник [13]. В соответствии с разработанными стратегическими направлениями [14] постоянно выполняются работы по созданию новых материалов [15–22].

После анализа имеющихся данных были проведены недостающие испытания по определению характеристик горючести различных ПКМ (стекло-

текстолиты, угле- и органопластики), трехслойных сотовых панелей на их основе, а также пленочного материала, имеющих различную толщину.

Трехслойные сотовые панели представляют собой элемент конструкции, состоящий из двух тонких обшивок, как правило 2–3-слойного стеклопластика толщиной 0,5...0,7 мм, и сотового заполнителя между ними. Сборка панели может проводиться с использованием клея или по бесклеевой технологии формования.

Основной объем испытаний был проведен на монолитных образцах ПКМ толщиной от 1 до 5 мм. Отдельные результаты получены на образцах толщиной от 0,25...0,4 и до 6...7 мм. Для испытания трехслойных сотовых панелей использовались образцы преимущественно толщиной 5...15 мм. Отдельные результаты получены на образцах толщиной 20...29 мм.

### Аппаратура и метод проведения испытаний

Подробное описание конструкции испытательного оборудования и процедуры испытаний приведено в приложении F, ч. I [6]. Для испытаний на горючесть согласно [6] использовалась специальная камера, в которой на держателе в вертикальном положении закреплялся образец. Ширина экспонируемой части образца составляла не менее 52 мм, высота — 290 мм. При проведении испытаний на нижнюю кромку образца в течение заданного времени экспозиции (12 или 60 с, в зависимости от функционального назначения материала) воздействовало пламя лабораторной газовой горелки Бунзена, высота пламени — около 40 мм (1,5 дюйма). Образец погружался в пламя на половину его высоты. В испытании определялись следующие характеристики: продолжительность остаточного самостоятельного горения и/или тления образца после удаления пламени горелки, инициирующего воспламенение; длина поврежденной части образца (длина прогорания), а также наличие и продолжительность горения падающих капель. Испытания проводились на трех параллельных образцах, после чего рассчитывалось среднее арифметическое полученных результатов.

### Результаты и их обсуждение

Для анализа была сделана выборка из огромного массива данных, приведенного в [13], которая была дополнена результатами последних исследований на пожаробезопасность образцов ПКМ, имеющих различную толщину (табл. 1–4). Анализ изменения характеристик горючести с увеличением толщины образцов показал следующее.

У всех образцов наблюдается уменьшение длины прогорания с увеличением их толщины, т. е. наи-

**Таблица 1.** Влияние толщины образцов стеклопластиков на регистрируемые характеристики горючести

Марка материала	Толщина, мм	Продолжительность остаточного горения, с	Длина прогорания, мм
<i>Экспозиция пламенем горелки 60 с</i>			
ВПС-36	1,0	3	27
	2,0	2	19
	5,0	1	1
ВПС-39П	0,3	1	63
	0,9	6	35
ВПС-42П	0,3	1	59
	1,0	2	51
	1,9	3	43
ВПС-47	0,7	1	111
	1,3	9	121
КАСТ-ВС	0,8	0	80
	1,5	2	60
КМКС-2м.120	0,5	2	190
	1,1	5	213
	1,9	50	204
КТМС-1П	0,4	2	87
	1,0	5	75
	2,0	14	30
СТ-69Н(М)	1,0	0	102
	2,0	4	54
	3,0	27	40
СТ-520	0,9	2	53
	2,2	1	41
	5,8	0	8
ЭПС-2	0,4	1	184
	1,8	28	179
Микросферотекстолит МСТ-10П	1,6	0	90
	3,4	0	85
	4,7	0	45
<i>Экспозиция пламенем горелки 12 с</i>			
ВПС-33	1,0	Более 60	Полностью
	2,0	Более 60	То же
	3,0	11	2
СТ-69Н(М)	1,0	7	22
	2,0	1	5
	3,0	1	2
КАСТ-ВС	0,5	8	57
	0,8	11	50

худшие значения по данной характеристике имеют самые тонкие образцы. Это совпадает с положением, принятым в [11]. Данный феномен может быть объяснен увеличением массы образца и, соответственно, повышением затрат тепла на прогрев материала.

**Таблица 2.** Влияние толщины образцов углепластиков на регистрируемые характеристики горючести

Марка материала	Толщина, мм	Продолжительность остаточного горения, с	Длина прогорания, мм
<i>Экспозиция пламенем горелки 60 с</i>			
ВКУ-18	0,6	2	156
	1,0	2	102
	2,2	45	83
ВКУ-22	1,0	0	81
	1,7	0	65
	6,0	0	2
ВКУ-23	1,1	0	93
	1,7	2	38
	5,9	0	3
ВКУ-24	1,2	0	72
	2,0	0	44
	6,7	0	2
ВКУ-28	0,9	2	90
	2,0	39	46
	4,1	1	4
ВКУ-29	1,0	17	195
	1,9	27	77
	3,6	42	15
ВКУ-32	1,1	6	111
	2,1	36	74
	4,7	15	9
ВКУ-33	1,0	1	84
	2,0	7	49
	2,5	9	27
ВКУ-39	1,2	0	73
	1,9	16	48
ВСЭ1212/HTS40	1,0	8	92
	2,1	15	37
КМКУ-2м.120	0,6	1	94
	1,2	1	114
	1,9	16	124
КМКУ-3.150	0,7	1	112
	1,1	1	104
	1,9	5	102
КМУ-7тМПС	1	1	124
	2	1	81
	3	13	48
<i>Экспозиция пламенем горелки 12 с</i>			
ВКУ-33	1,0	8	26
	2,0	0	2
	2,5	0	1
ВКУ-39	0,5	Более 60	Полностью
	1,2	18	17
	1,9	0	1
ВСЭ1212/HTS40	1,0	16	16
	2,1	0	0

**Таблица 3.** Влияние толщины образцов органопластиков и пленочного материала на регистрируемые характеристики горючести

Марка материала	Толщина, мм	Продолжительность остаточного горения, с	Длина прогорания, мм
<i>Экспозиция пламенем горелки 60 с</i>			
Органит 5Н	0,6	0	150
	2,7	40	40
	7,0	13	2
Органопластик УП-2217/Русар	0,4	3	45
	4,0	9	31
Опытный органопластик	0,4	1	78
	1,0	50	70
	2,1	0	55
	3,2	0	62
<i>Экспозиция пламенем горелки 12 с</i>			
Опытный органопластик	0,4	1	73
	1,0	15	40
	2,1	0	3
	3,2	0	1
Пленка из полиарилсульфона	0,05	17	238
	0,1	28	161

Вследствие этого снижается масса полимера, прогретого до температуры термодеструкции и, соответственно, уменьшается выход горючих компонентов в газовую фазу, что приводит к уменьшению высоты пламени и дальнейшему снижению прогрета материала.

По продолжительности остаточного горения у образцов трехслойных сотовых панелей не выявлено существенного изменения данной характеристики с изменением их толщины. Это может быть объяснено тем, что при проведении испытаний пламя горелки подводилось не к геометрическому центру торца образца, а к середине нижней кромки обшивки. Вследствие этого увеличение толщины панели практически не приводит к изменению условий прогрета – термодеструкции – горения тонкослойной обшивки и, соответственно, продолжительности горения испытываемого образца.

По характеристике продолжительности остаточного горения для образцов монолитных композиционных материалов (стекло-, угле- и органопластики) установлен нелинейный (с экстремумом) характер ее изменения с увеличением их толщины. Наихудшие значения (наибольшая продолжительность остаточного горения) при экспозиции 60 с выявлены у образцов толщиной 2...3 мм, при экспозиции 12 с — около 1 мм. При изменении термостойкости полимерного связующего происходил небольшой сдвиг максимума продолжительности

**Таблица 4.** Влияние толщины образцов трехслойных со-  
товых панелей на регистрируемые характеристики горю-  
чести при экспозиции пламенем горелки 60 с

Марка или состав панели	Толщина, мм	Продолжительность остаточного горения, с	Длина прогорания, мм
Fibreklam 1100 (Hexcel)	6	3	49
	10	2	36
	15	2	31
ЕСРА 233 (Eurocomposite)	10	1	85
	15	2	50
Панель состава: обшивки СТП-520, сотопласт ПСП 1-2,5-48. Бесклеевая технология сборки	5	2	48
	10	3	35
	15	1	28
	20	1	25
Панель состава: обшивки КТМС-1, сотопласт ССП 1-3,5, клей ВК-46	11	1	80
	29	4	4
Панель состава: обшивки ЭПС-2, сотопласт ПСП 1-2,5-48, клей ВК-46	10	1	86
	16	1	50

остаточного горения в сторону больших или меньших толщин образцов. Таким образом, видно, что по продолжительности остаточного горения принятое в [11] положение не соответствует действительности.

Экстремальный характер изменения продолжительности остаточного горения может быть объяснен следующими факторами. Образцы материалов большой толщины (свыше 3 мм) за время экспозиции небольшим пламенем лабораторной горелки вследствие более высоких затрат тепла на прогрев материала не успевают прогреться в значительной степени из-за малокалорийности источника воспламенения, а также из-за увеличения теплотерь от пламени горящего образца внутрь конденсированной фазы. Вследствие этого продолжительность остаточного самостоятельного горения снижается относительно максимальной.

Образцы материалов малой толщины (менее 1 мм) за время экспозиции пламенем горелки в зоне его воздействия успевают в значительной мере выгореть, а оставшаяся малая часть полимера не может обеспечить длительного поддержания пламени, поэтому тонкие образцы имеют малую продолжительность самостоятельного остаточного горения.

В связи с вышеизложенным наступление максимальной продолжительности горения для разных периодов экспозиции различается по толщинам: при большей продолжительности экспозиции максимум наступает при несколько больших толщинах образ-

**Таблица 5.** Предложенный зарубежными исследователями ряд толщин образцов для доказательства соответствия материала требованиям авиационных норм [11]

Толщина изделия или материала, мм	Испытываемые толщины для доказательства соответствия, мм
От 0,5 до 1,5	0,5 и 1,5
От 1,5 до 2,5	1,5 и 2,5
От 2,5 до 6,0	2,5 и 6,0
От 6,0 до 12,5	6,0 и 12,5
От 12,5 до 25,5	12,5 и 25,5
От 25,5 до 44,5	25,5 и 44,5
44,5 и более	44,5

цов — 2...3 мм при экспозиции 60 с и около 1 мм при экспозиции 12 с.

В настоящей работе рассмотрен только один тип термопластичного материала (полиарилсульфоно-вая пленка) и совсем не рассмотрены газонаполненные материалы (пенопласты). Можно предположить, что вследствие образования расплава и наличия каплепадения нельзя исключить наличия более сложной зависимости влияния толщины образца на длину прогорания и продолжительность остаточного самостоятельного горения для этих типов материалов.

Согласно [11] при испытаниях по определению других характеристик пожарной опасности — дымообразующей способности и тепловыделения при горении используются квалификационные ряды. Один из вариантов этих рядов приведен в табл. 5. Считается, что материал любой толщины отвечает требованиям, если образцы в ряду с толщиной меньше и больше используемой соответствуют предъявляемым к ним требованиям.

Целесообразно рассмотреть возможность и необходимость применения такого или аналогичного (с близкими интервалами толщин) ряда и при выполнении квалификационных испытаний полимерных материалов на горючесть согласно требованиям авиационных норм [6]. Например, может быть предложен ряд толщин, соответствующий метрической системе мер: 0,2...0,3 (минимальная толщина однослойного пластика); 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 15; 25; 40 мм (для ПКМ толщиной 40 мм и более), или его сжатый вариант: 0,5; 2; 5; 15; 25 мм. Если минимально возможная, используемая в изделии толщина материала меньше минимальной толщины в ряду, то при проведении испытаний следует ограничиться минимальной используемой толщиной. Если максимальная толщина материала в изделии больше максимальной толщины образца в ряду (40 или 25 мм), то следует ограничиться максимальной толщиной образца в ряду.

Например, в изделии используются детали из ПКМ толщиной 1,0; 1,25; 1,5; 1,75 и 2,0 мм. При проведении квалификационных испытаний необхо-

димо провести испытания образцов толщиной 1,0 и 2,0 мм (согласно длинному ряду). Если оба типа соответствуют требованиям авиационных норм, то и все образцы с промежуточными значениями толщин считаются также соответствующими им.

### Выводы

По влиянию толщины образцов на характеристики горючести, определяемые согласно требованиям авиационных норм, установлено следующее:

- уменьшение длины прогорания образцов материалов (как монолитных композиционных, так и конструктивных сотовых панелей) по мере увеличения толщины испытываемого образца;
- отсутствие существенного влияния толщины сотовых панелей (толщины сотового заполнителя) на продолжительность остаточного самостоятельного горения;

- нелинейный (с наличием максимума) характер изменения продолжительности остаточного горения для образцов монолитных композиционных материалов (при экспозиции 60 с максимальная продолжительность остаточного горения наблюдается при толщинах 2...3 мм, при экспозиции 12 с — около 1 мм).

При выполнении квалификационных испытаний на горючесть образцов ПКМ и панелей на их основе рекомендуется проводить испытания образцов различных толщин, аналогичных применяемому ряду для квалификационных испытаний на дымообразование и тепловыделение.

\*\*\*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 14-29-10186 (код “офи-м”).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sarkos G. Evolution of FAA Fire Safety R&D Over the Years // The Fifth Triennial Fire & Cabin Safety Research Conference, 29 October – 1 November 2007, Atlantic City, NJ. URL : [http://www.fire.tc.faa.gov/2007Conference/files/General\\_Fire/TueAM/SarkosFAAFire/SarkosFAAFirePres.pdf](http://www.fire.tc.faa.gov/2007Conference/files/General_Fire/TueAM/SarkosFAAFire/SarkosFAAFirePres.pdf) (дата обращения: 30.09.2014 г.).
2. Нормы летной годности гражданских самолетов СССР. — 2-е изд. — М. : ЦАГИ, 1974. — 344 с.
3. Aircraft Materials Fire Test Handbook // DOT/FAA/AR-00/12. — 235 p.
4. Барботько С. Л. Пожаробезопасность авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. — 2012. — № 5. — С. 431–439.
5. Барботько С. Л., Кириллов В. Н., Шуркова Е. Н. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов авиационного назначения // Авиационная промышленность. — 2013. — № 2. — С. 55–58.
6. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории / МАК. — М. : ОАО “Авиаиздат”, 2009. — 267 с.
7. Marker T. Update Handbook Chapters // International Aircraft Materials Fire Test Working Group, 23 June 2010, Cologne, Germany. — 15 p. URL : <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/materials/June10Meeting/marker-0610-Part25Update.pdf> (дата обращения: 30.09.2014 г.).
8. Campbell S., Jensen M. Flammability standardization task group // The Sixth Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference, 25–28 October 2010, Atlantic City, NJ. — 28 p. URL : [https://www.fire.tc.faa.gov/2010Conference/files/Materials\\_Safety\\_Development\\_II/CampbellStandardization/CampbellStandardizationPres.pdf](https://www.fire.tc.faa.gov/2010Conference/files/Materials_Safety_Development_II/CampbellStandardization/CampbellStandardizationPres.pdf) (дата обращения: 30.09.2014 г.).
9. Gardlin J. A threat-based approach to part 25 flammability regulations // The Sixth Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference, 25–28 October 2010, Atlantic City, NJ. — 22 p. URL: [http://www.fire.tc.faa.gov/2010Conference/files/Aircraft\\_Fire\\_Safety/GardlinPart25/GardlinPart25-Pres.pdf](http://www.fire.tc.faa.gov/2010Conference/files/Aircraft_Fire_Safety/GardlinPart25/GardlinPart25-Pres.pdf) (дата обращения: 30.09.2014 г.).
10. Quintiere J. G., Downey B. P., Lyon R. E. An investigation of the vertical Bunsen burner test for flammability of plastics // FAA Report DOT/FAA/AR-TN11/19. — 2012. — 20 p.
11. Campbell S., Jensen M., Sattayatham P. Flammability standardization task group — Final reports: Federal Aviation Administration Draft Policy Memo, AMN-115-09-XXX, 20 August 2009 // FAA Report DOT/FAA/TC-12/10. — 2012. — 881 p.
12. Барботько С. Л., Швец Н. И., Застрогина О. Б., Изотова Т. Ф. Исследование влияния толщины стеклопластиков на характеристики тепловыделения при горении // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 7. — С. 30–36.
13. Барботько С. Л., Воробьев В. Н. Пожаробезопасность авиационных материалов и элементов конструкций : справочник. — М. : ВИАМ. 2007. — 543 с.

14. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. — 2012. — № 5. — С. 7–17.
15. Каблов Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. — 2012. — Т. 82, № 6. — С. 520–530.
16. Деметьева Л. А., Сереженков А. А., Лукина Н. Ф., Куцевич К. Е. Клеевые препреги и слоистые материалы на их основе // *Авиационные материалы и технологии*. — 2013. — № 2. — С. 19–21.
17. Застрогина О. Б., Швец Н. И., Постнов В. И., Серкова Е. А. Фенолформальдегидные связующие нового поколения для материалов интерьера // *Авиационные материалы и технологии*. — 2012. — № 5. — С. 265–272.
18. Давыдова И. Ф., Кавун Н. С. Стеклопластики — многофункциональные композиционные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. — 2012. — № 5. — С. 253–260.
19. Кондрашов Э. К., Постнов В. И., Петухов В. И., Кавун Н. С., Абрамов П. А., Юдин А. А., Барботько С. Л. Исследование свойств трехслойных панелей на модифицированном связующем ФПР-520Г // *Авиационные материалы и технологии*. — 2009. — № 3. — С. 19–23.
20. Борцев А. В., Хрульков А. В., Халтурина Д. С. Изготовление низкопористого полимерного композиционного материала для применения в слабо- и средненагруженных конструкциях // *Труды ВИАМ*. — 2014. — № 7, ст. 03. URL : <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/682.pdf> (дата обращения: 30.09.2014 г.).
21. Гуляев И. Н., Власенко Ф. С., Зеленина И. В., Раскутин А. Е. Направления развития термостойких углепластиков на основе полиимидных и гетероциклических полимеров // *Труды ВИАМ*. — 2014. — № 1, ст. 04. URL : <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/636.pdf> (дата обращения: 30.09.2014 г.).
22. Бейдер Э. Я., Петрова Г. Н., Изотова Т. Ф., Барботько С. Л. Стеклопластики на термопластичной матрице // *Труды ВИАМ*. — 2013. — № 7, ст. 03. URL : <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/116.pdf> (дата обращения: 30.09.2014 г.).
23. Пат. 2447104 Российская Федерация. МПК С08Л 63/00, С08К 5/103, В29 В15/10. Эпоксидная композиция / Мухаметов Р. Р., Ахмадиева К. Р., Чурсова Л. В., Каблов Е. Н., Хрульков А. В., Душин М. И. — № 2010140692/05; заявл. 05.10.2010 г.; опубл. 10.04.2012 г., Бюл. № 10.

*Материал поступил в редакцию 8 октября 2014 г.*

English

## FEATURES THE TESTING OF AVIATION MATERIALS ON FIRE SAFETY.

### Part 1. Test on flammability — influence of sample thickness on registered characteristics

**BARBOTKO S. L.**, Candidate of Technical Sciences, Chief of Laboratory "Research of Nonmetallic Materials on Climatic, Microbiological Resistance and Fire Safety", Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Science-Research Institute of Aviation Materials" (VIAM) (Radio St., 17, Moscow, 105005, Russian Federation; e-mail address: slbarbotko@yandex.ru)

**VOLNYY O. S.**, Leading Engineer of Laboratory "Research of Nonmetallic Materials on Climatic, Microbiological Resistance and Fire Safety", FSUE VIAM (Radio St., 17, Moscow, 105005, Russian Federation)

**KIRIENKO O. A.**, Candidate of Chemical Sciences, Leading Research Associate of Laboratory "Research of Nonmetallic Materials on Climatic, Microbiological Resistance and Fire Safety", FSUE VIAM (Radio St., 17, Moscow, 105005, Russian Federation)

**SHURKOVA E. N.**, Engineer of 2th category of Laboratory "Research of Nonmetallic Materials on Climatic, Microbiological Resistance and Fire Safety", FSUE VIAM (Radio St., 17, Moscow, 105005, Russian Federation)

#### ABSTRACT

According to requirements of aviation norms, tests for definition characteristics of flammability under the influence of open flame samples of materials for all used thickness are subject. For the purpose of tests volume reduction, foreign researchers have makes the decision that "Data from testing a thinner construction substantiates a thicker construction made of the same materials".

Researches on influence of sample thickness of polymeric composite materials and core panels on their basis on flammability characteristics (burn-out length, duration of residual independent burning) according to requirements of aviation norms are conducted.

In this article the characteristics of flammability for different types polymeric materials of aviation assignment (glass-, organ- and carbon reinforced plastics, core panels) were analyzed. The obtained experimental data show that the accepted assumption is carried out for burn-out length, but not always operates for the characteristic of duration of residual burning. It is offered at performance of qualification tests on flammability to use the standard number of thickness similar to applied at definition the smoke and heat release characteristics.

**Keywords:** flammability; residual burning; burn-out length; polymeric composite material; core panel; sample thickness.

## REFERENCES

1. Sarkos G. Evolution of FAA Fire Safety R&D Over the Years. *The Fifth Triennial Fire & Cabin Safety Research Conference*, 29 October – 1 November 2007, Atlantic City, NJ. Available at: [http://www.fire.tc.faa.gov/2007Conference/files/General\\_Fire/TueAM/SarkosFAAFire/SarkosFAAFirePres.pdf](http://www.fire.tc.faa.gov/2007Conference/files/General_Fire/TueAM/SarkosFAAFire/SarkosFAAFirePres.pdf) (Accessed 30 September 2014).
2. *Norms of the flight validity for civil aircrafts of the USSR*. Second edition. Moscow, TsAGI, 1974. 344 p. (in Russian).
3. *Aircraft Materials Fire Test Handbook*. DOT/FAA/AR-00/12. 235 p.
4. Barbotko S. L. Pozharobezопасnost aviatsionnykh materialov [Fire safety of aviation materials]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technology*, 2012, no. 5, pp. 431–439.
5. Barbotko S. L., Kirillov V. N., Shurkova E. N. Otsenka pozharnoy bezопасnosti polimernykh kompozitsionnykh materialov aviatsionnogo naznacheniya [Assessment of fire safety of polymeric composite materials of aviation assignment]. *Aviatsionnaya promyshlennost — Aviation Industry*, 2013, no. 2, pp. 55–58.
6. *Aviation rules. Chapter 25. Airworthiness norms for a transport category airplanes. Interstate Aviation Committee*. Ed. 3 with amendments 1–6. Moscow, Aviaizdat, 2009. 274 p. (in Russian).
7. Marker T. Update Handbook Chapters. *International Aircraft Materials Fire Test Working Group*, 23 June 2010, Cologne, Germany. 15 p. Available at: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/materials/June10-Meeting/marker-0610-Part25Update.pdf> (Accessed 30 September 2014).
8. Campbell S., Jensen M. Flammability standardization task group. *The Sixth Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference*, 25–28 October 2010, Atlantic City, NJ. 28 p. Available at: [https://www.fire.tc.faa.gov/2010Conference/files/Materials\\_Safety\\_Development\\_II/Campbell-Standardization/CampbellStandardizationPres.pdf](https://www.fire.tc.faa.gov/2010Conference/files/Materials_Safety_Development_II/Campbell-Standardization/CampbellStandardizationPres.pdf) (Accessed 30 September 2014).
9. Gardlin J. A threat-based approach to part 25 flammability regulations. *The Sixth Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference*, 25–28 October 2010, Atlantic City, NJ. 22 p. Available at: [http://www.fire.tc.faa.gov/2010Conference/files/Aircraft\\_Fire\\_Safety/GardlinPart25/Gardlin-Part25Pres.pdf](http://www.fire.tc.faa.gov/2010Conference/files/Aircraft_Fire_Safety/GardlinPart25/Gardlin-Part25Pres.pdf) (Accessed 30 September 2014).
10. Quintiere J. G., Downey B. P., Lyon R. E. An investigation of the vertical Bunsen burner test for flammability of plastics. *FAA Report DOT/FAA/AR-TN11/19*, 2012. 20 p.
11. Campbell S., Jensen M., Sattayatham P. Flammability standardization task group — Final reports: Federal Aviation Administration Draft Policy Memo, AMN-115-09-XXX, 20 August 2009. *FAA Report DOT/FAA/TC-12/10*, 2012. 881 p.
12. Barbotko S. L., Shvets N. I., Zastrogina O. B., Izotova T. F. Issledovaniye vliyaniya tolshchiny stekloplastikov na kharakteristiki teplovydeleniya pri gorenii [Research of influence of thickness of fibre-glasses on heat release characteristics at burning]. *Pozharovzryvobezопасnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 7, pp. 30–36.
13. Barbotko S. L., Vorobyev V. N. *Pozharobezопасnost aviatsionnykh materialov i elementov konstruksiy. Spravochnik* [Fire safety of aviation materials and elements of designs. Handbook]. Moscow, VIAM Publ., 2007. 543 p.
14. Kablov E. N. Strategicheskkiye napravleniya razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategic direction of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technology*, 2012, no. 5, pp. 7–17.



15. Kablov E. N. Materialy i khimicheskiye tekhnologii dlya aviatsionnoy tekhniki [Materials and chemical technologies for aviation technics]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk — Messenger of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530.
16. Demytyeva L. A., Serezhenkov A. A., Lukina N. F., Kutsevich K. E. Kleevyye prepregi i sloistyye materialy na ikh osnove [Glue prepregs and layered materials on their basis]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technology*, 2013, no. 2, pp. 19–21.
17. Zastrogina O. B., Shvets N. I., Postnov V. I., Serkova E. A. Fenolformaldegidnyye svyazuyushchiye novogo pokoleniya dlya materialov interyera [Phenolformaldehyde binding new generation for interior materials]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technology*, 2012, no. S, pp. 265–272.
18. Davydova I. F., Kavun N. S. Stekloplastiki — mnogofunktsionalnyye kompozitsionnyye materialy [Fibreglasses — multifunction composite materials]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technology*, 2012, no. S, pp. 253–260.
19. Kondrashov E. K., Postnov V. I., Petukhov V. I., Kavun N. S., Abramov P. A., Yudin A. A., Barbotko S. L. Issledovaniye svoystv trekhslonnykh paneley na modifitsirovannom svyazuyushchem FPR-520G [Research of properties of core panels on modified binding FPR-520G]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technology*, 2009, no. 3, pp. 19–23.
20. Borshchev A. V., Khrulkov A. V., Khalturina D. S. Izgotovleniye nizkoporistogo polimernogo kompozitsionnogo materiala dlya primeneniya v slabo- i srednenagruzhennykh konstruktsiyakh [Manufacturing of low-porous polymeric composite material for application in weak and middle load designs]. *Trudy VIAM — Proceeding of VIAM*, 2014, no. 7, art. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/682.pdf> (Accessed 30 September 2014).
21. Gulyaev I. N., Vlasenko F. S., Zelenina I. V., Raskutin A. E. Napravleniya razvitiya termostoykikh ugleplastikov na osnove poliimidnykh i geterotsiklicheskiykh polimerov [The directions of development heat-resistant carbonplastics on the basis of polyimide and heterocyclic polymers]. *Trudy VIAM — Proceeding of VIAM*, 2014, no. 1, art. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/636.pdf> (Accessed 30 September 2014).
22. Beyder E. Ya., Petrova G. N., Izotova T. F., Barbotko S. L. Stekloplastiki na termoplastichnoy matritse [Fibreglasses on thermoflexible matrix]. *Trudy VIAM — Proceeding of VIAM*, 2013, no. 7, art. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/116.pdf> (Accessed 30 September 2014).
23. Mukhametov R. R., Akhmadieva K. R., Chursova L. V., Kablov E. N., Khrulkov A. V., Dushin M. I. *Epoksidnaya kompozitsiya* [Epoxy compound]. Patent RU, no. 2447104, 10.04.2012.

**А. И. БЫКОВ**, ведущий инженер службы пожарной безопасности  
ООО "Газпром трансгаз Ухта" (Россия, Республика Коми, 169300, г. Ухта,  
просп. Ленина, 39/2; e-mail: abykov@sgr.gazprom.ru)

УДК 658.382

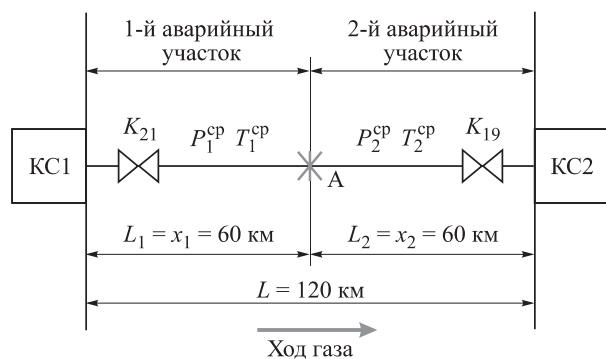
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗА НА УЧАСТКЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Показано, что наряду со строгим подходом к определению массы газа, находившегося на аварийном участке газопровода до аварии, такого же строгого обоснования требует параметр среднего давления газа на рассматриваемом аварийном участке газопровода. Дано обоснование методики расчета этого параметра на примере аварийного разрыва линейной части магистрального газопровода.

**Ключевые слова:** аварийный участок магистрального газопровода; масса газа; среднее давление газа.

Для определения массы газа  $M_{г}$ , находившегося в трубе на аварийном участке магистрального газопровода (МГ) до аварии, в Методических указаниях СТО Газпром 2-2.3-351–2009 [1] рекомендовано выражение, содержащее в качестве расчетного параметра среднее давление газа  $P^{cp}$  на рассматриваемом аварийном участке газопровода. Однако методика расчета данного параметра в Методических указаниях [1] не приводится. Такая методика отсутствует также в основных нормативных документах (ГОСТ Р 12.3.047–98 [2], приказы МЧС № 404 и № 649 [3], РД 03-409–01 [4] и др.), действующих в настоящее время и регламентирующих процедуру проведения оценки безопасности производственных объектов, оперирующих с массами горючих и взрывоопасных веществ.

Между тем строгий подход к определению массы газа  $M_{г}$ , находившегося на аварийном участке газопровода до аварии, требует строгого обоснования методики определения параметра  $P^{cp}$  на рассматриваемом аварийном участке газопровода. Обоснованию такой методики и посвящается настоящая статья.



Расчетная схема: А — точка разрыва газопровода

Обоснование методики выполняется с учетом рекомендаций, изложенных в [1]. Для этого используется, как пример, расчетная схема, представленная на рисунке. Схема предполагает, что аварийный разрыв магистрального газопровода возникает посередине выбранного участка между двумя соседними компрессорными станциями КС1 и КС2, образуя два аварийных участка: 1-й (АУ-1) — от КС1 до точки разрыва А; 2-й (АУ-2) — от точки разрыва А до КС2. Примерные линейные размеры этих участков указаны на рисунке.

Для расчета использовались следующие исходные данные:

- горючее вещество — природный газ состава: метан  $CH_4$  — 98,5 %;  $CO_2$  — 0,5 %;  $N_2$  — 1,0 %;
- наружный диаметр газопровода  $D_n = 1420$  мм;
- толщина стенки труб  $\delta_{ст} = 16,5$  мм;
- внутренний диаметр труб  $d_{вн} = 1387$  мм;
- давление нагнетания  $P_{наг} = 7,5$  МПа;
- температура газа на входе  $T_n = 283,15$  К (10 °С);
- температура грунта  $T_{гр} = 278,15$  К (5 °С).

В соответствии с рекомендациями [1] расчет истечения газа выполняется по каждому аварийному участку в отдельности.

### 1-й аварийный участок (АУ-1)

Масса газа  $M_{г(1)}$ , находящегося в АУ-1 газопровода до отсечения линейных кранов, составит [1]:

$$M_{г(1)} = \frac{L_1 \pi d_{вн}^2 P_1^{cp}}{4R_{г} Z^{cp} T_1^{cp}} + M_{к(1)}, \quad (1)$$

где  $L_1$  — расстояние от КС1 до точки разрыва, м;  
 $P_1^{cp}$ ,  $T_1^{cp}$  — среднее давление (Па) и температура (К) газа, определяемые для рассматриваемого участка газопровода;

$R_\Gamma$  — удельная газовая постоянная для природного газа;

$Z^{cp}$  — среднее значение коэффициента сжимаемости природного газа, принимаемое в соответствии с ГОСТ 30319.2–96 (приложение Г) [5]  $Z^{cp} = 0,9521$  (погрешность определения 0,09 %);  $M_{кк(1)}$  — масса газа, нагнетаемая в 1-й аварийный участок до отсечения линейных кранов, кг.

Таким образом, для решения уравнения (1) необходимо найти параметры  $P_1^{cp}$ ,  $T_1^{cp}$ ,  $R_\Gamma$  и  $M_{кк(1)}$ .

Среднее давление  $P_1^{cp}$  для АУ-1 определяется по формуле [6]:

$$P_1^{cp} = \frac{2}{3} \left( P_H + \frac{P_0^2}{P_H + P_0} \right), \quad (2)$$

где  $P_0$  — давление в точке разрыва трубопровода А, МПа; рассчитывается из выражения, рекомендованного в [1]:

$$P_0 = \sqrt{P_H^2 - (P_H^2 - P_K^2) \frac{L_1}{L}}; \quad (3)$$

$P_H, P_K$  — давление соответственно в начале и конце участка газопровода между соседними КС1 и КС2 до момента его разрыва, МПа;

$L_1$  — расстояние от КС1 до точки разрыва А, м;

$L$  — расстояние от КС1 до КС2, м.

Давление газа в начале рассматриваемого участка  $P_H$  между КС1 и КС2 определяется в соответствии с п. 12.17 ОНТП 51-1–85 [7]:

$$P_H = P_{наг} - \Delta P_{вых} - \Delta P_{охл}, \quad (4)$$

где  $P_{наг}$  — давление нагнетания на выходе из компрессорного цеха, МПа;  $P_{наг} = 7,5$  МПа;

$\Delta P_{вых}$  — потери давления до точки подключения к линейной части МГ, МПа; определяются по п. 3.12, табл. 1 [7]; для двухступенчатой очистки газа  $\Delta P_{вых} = \Delta P_{вс} + \Delta P_{вн}$ ;

$\Delta P_{вс}$  — давление в режиме работы на всасывание;  $\Delta P_{вс} = 0,19$  МПа;

$\Delta P_{вн}$  — давление в режиме работы на нагнетание;  $\Delta P_{вн} = 0,11$  МПа;

$\Delta P_{вых} = 0,19 + 0,11 = 0,3$  МПа;

$\Delta P_{охл}$  — потери давления в системе охлаждения газа, включая ее обвязку;  $\Delta P_{охл} = 0,06$  МПа.

Тогда

$$P_H = 7,5 - 0,3 - 0,06 = 7,14 \text{ МПа.}$$

Значение  $P_H = 7,14$  МПа характеризует также давление газа в начале АУ-1.

Давление в конце участка газопровода  $P_K$  между соседними КС1 и КС2 определится из очевидного условия

$$P_K = P_H - \Delta P, \quad (5)$$

где  $\Delta P$  — потери давления на рассматриваемом участке газопровода, МПа.

Величину  $\Delta P$  (МПа) можно определить в соответствии с [8] из уравнения Дарси (1857) – Вейсбаха (1845):

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{d_{вн}} \rho_\Gamma \frac{w^2}{2}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  — коэффициент гидравлического сопротивления;

$\rho_\Gamma$  — плотность природного газа в газопроводе, кг/м<sup>3</sup>;

$w$  — скорость потока газа в начале участка, м/с.

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  в работе [1] для газопровода  $D_H = 1420$  мм при рабочем давлении  $P_H = 7,5 \div 15$  МПа оценивается как  $\lambda = 0,00869 \div 0,00854$ , но формула расчета этой величины, в том числе с учетом рабочего давления, не приводится. В то же время в существующих нормативных документах и литературных источниках определяется зависимость величины  $\lambda$  от числа Рейнольдса  $Re$ , коэффициента шероховатости стенок трубопровода  $k_{ш}$  и его внутреннего диаметра  $d_{вн}$ . Так, в работе [9] значение коэффициента гидравлического сопротивления для квадратичного режима течения предлагается рассчитывать по эмпирической формуле в зависимости от внутреннего диаметра газопровода  $d_{вн}$  (при условии, что он подставляется в мм) при шероховатости стенок  $k_{ш} = 0,03$ :

$$\lambda = 0,03817 / d_{вн}^{0,2}. \quad (7)$$

При этом граница перехода к квадратичному режиму определяется из неравенства

$$Q_{сут} > Q_{сут}^{кв}, \quad (8)$$

где  $Q_{сут}$  — суточная производительность газопровода, м<sup>3</sup>/сут;

$Q_{сут}^{кв}$  — переходный показатель суточной производительности газопровода к квадратичному режиму, м<sup>3</sup>/сут;

$$Q_{сут}^{кв} = 0,4 \cdot 10^6 d_{вн}^{2,5} \mu_g / \Delta; \quad (9)$$

$\mu_g$  — динамическая вязкость газа, Па·с;

$\Delta$  — относительная плотность газа, определяемая как отношение плотностей газа  $\rho_c$  и воздуха  $\rho_v$  при стандартных условиях:

$$\Delta = \rho_c / \rho_v. \quad (10)$$

Величина  $\rho_v$  для стандартных условий является табличной и составляет 1,206 кг/м<sup>3</sup>; величина  $\rho_c$  зависит от состава природного газа и определяется в соответствии с ГОСТ 30319.1–96 [5] по формуле

$$\rho_c = m_\Gamma P_c / (R T_c Z_c), \quad (11)$$

где  $m_\Gamma$  — молярная масса газа;

$P_c, T_c$  — давление и температура при стандартных условиях;  $P_c = 0,1013 \cdot 10^6$  Па;  $T_c = 293,15$  К;

$R$  — универсальная газовая постоянная;  
 $R = 8314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;  
 $Z_c$  — фактор сжимаемости.

Молярная масса природного газа определяется как сумма атомных масс всех элементов, входящих в его состав. Атомные массы элементов находятся из таблицы Менделеева:

- метан  $\text{CH}_4$ , доля в составе  $x_{\text{CH}_4} = 98,5 \%$ :

$$m_{\text{CH}_4} = 12,011 + 1,008 \cdot 4 = 16,043 \text{ кг/моль};$$

- диоксид углерода  $\text{CO}_2$ , доля в составе  $x_{\text{CO}_2} = 0,5 \%$ :

$$m_{\text{CO}_2} = 12,011 + 16,0 \cdot 2 = 44,011 \text{ кг/моль};$$

- азот  $\text{N}_2$ , доля в составе  $x_{\text{N}_2} = 1,0 \%$ :

$$m_{\text{N}_2} = 14,001 \cdot 2 = 28,002 \text{ кг/моль}.$$

Исходя из процентного содержания этих элементов в природном газе (см. исходные данные), его молярная масса составит:

$$m_{\Gamma} = m_{\text{CH}_4} x_{\text{CH}_4} + m_{\text{CO}_2} x_{\text{CO}_2} + m_{\text{N}_2} x_{\text{N}_2}, \quad (12)$$

где  $m_{\text{CH}_4}$ ,  $m_{\text{CO}_2}$ ,  $m_{\text{N}_2}$  — молярные массы метана, диоксида углерода и азота соответственно.

Подставив значения молярных масс и их долевого содержания в (12), получим:

$$m_{\Gamma} = 16,043 \cdot 0,985 + 44,011 \cdot 0,005 + 28,002 \cdot 0,01 = 16,302 \text{ кг/моль}.$$

В соответствии с табл. 1 ГОСТ 30319.1–96 [5] фактор сжимаемости  $Z_c$  может быть принят равным 0,9981 для метана  $\text{CH}_4$ , так как его содержание в рассматриваемом природном газе превышает 98 %.

В этом случае плотность газа  $\rho_c$  при стандартных условиях составит:

$$\rho_c = 16,302 \cdot 0,1013 \cdot 10^6 / (8314 \cdot 293,15 \cdot 0,9981) = 0,678 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда относительная плотность природного газа

$$\Delta = 0,678 / 1,206 = 0,562.$$

Динамическая вязкость газа  $\mu_g$  определяется в соответствии с рекомендациями [7] из выражения

$$\mu_g = 5,1 \cdot 10^{-6} [1 + \rho_c (1,1 - 0,25 \rho_c)] \times [0,037 + T_{\text{пр}} (1 - 0,104 T_{\text{пр}})] \left[ 1 + \frac{P_{\text{пр}}^2}{30(T_{\text{пр}} - 1)} \right],$$

где  $T_{\text{пр}}$ ,  $P_{\text{пр}}$  — приведенные температура и давление газа, определяемые из соотношений:

$$T_{\text{пр}} = T/T_{\text{кр}}; \quad P_{\text{пр}} = P/P_{\text{кр}};$$

$T_{\text{кр}}$ ,  $P_{\text{кр}}$  — критические параметры природного газа, определяемые, строго говоря, с учетом долевого состава  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ ;

$$P_{\text{кр}}^{\text{пр}} = P_{\text{кр}}^{\text{CH}_4} x_{\text{CH}_4} + P_{\text{кр}}^{\text{CO}_2} x_{\text{CO}_2} + P_{\text{кр}}^{\text{N}_2} x_{\text{N}_2};$$

$$T_{\text{кр}}^{\text{пр}} = T_{\text{кр}}^{\text{CH}_4} x_{\text{CH}_4} + T_{\text{кр}}^{\text{CO}_2} x_{\text{CO}_2} + T_{\text{кр}}^{\text{N}_2} x_{\text{N}_2}.$$

При этом значения  $P_{\text{кр}}$  для  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  определяются по таблицам (например, по табл. 21 из [7]). Тогда критические значения этих параметров для рассматриваемого случая составят:

$$P_{\text{кр}}^{\text{пр}} = 4,64 \cdot 0,985 + 7,386 \cdot 0,005 + 3,394 \cdot 0,01 = 4,64 \text{ МПа};$$

$$T_{\text{кр}}^{\text{пр}} = 190,66 \cdot 0,985 + 304,26 \cdot 0,005 + 126,2 \cdot 0,001 = 190,58 \text{ К}.$$

В этом случае приведенные значения температур и давления при  $T = 283,15 \text{ К}$  ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и  $P = 7,14 \text{ МПа}$  примут значения:

$$T_{\text{пр}} = 283,15 / 190,58 = 1,49;$$

$$P_{\text{пр}} = 7,14 / 4,64 = 1,54.$$

Подставив полученные значения, можно определить динамическую вязкость природного газа при заданных условиях транспортирования:

$$\mu_g = 5,1 \cdot 10^{-6} [1 + 0,678(1,1 - 0,25 \cdot 0,678)] \times [0,037 + 1,49(1 - 0,104 \cdot 1,49)] \times [1 + 1,54^2 / (30(1,49 - 1))] = 12,52 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Теперь можно оценить параметр квадратичного режима прокачки, имея в виду, что значение  $\mu_g$  подставляется в  $\text{кг} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ :  $12,52 \cdot 10^{-6} / 9,8 = 1,277 \cdot 10^{-6}$ :

$$Q_{\text{сут}}^{\text{кв}} \geq 0,4 \cdot 10^6 \cdot 1387^{2,5} \cdot 1,277 \cdot 10^{-6} / 0,562 > 65,12 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{сут}. \quad (15)$$

Годовая производительность  $Q_{\text{год}}$  газопровода обоснована в работе [10] (табл. 1).

Как видно из табл. 1, при  $P_{\text{наг}} = 7,5 \text{ МПа}$ ,  $P_{\text{вс}} = 5,1 \text{ МПа}$  и  $D_y = 1400 \text{ мм}$  годовая производительность составляет  $(28,4 \div 34,7) \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$ . Тогда суточная производительность газопровода

$$Q_{\text{сут}} = Q_{\text{год}} / 365 = (28,4 \div 34,7) \cdot 10^9 / 365 = (77,8 \div 93,2) \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{сут}. \quad (16)$$

**Таблица 1.** Годовая производительность  $Q_{\text{год}}$  (млрд.  $\text{м}^3/\text{год}$ ) магистрального газопровода по В. Д. Белицкому [10]

Условный диаметр $D_y$ , мм	Параметры нагнетания	
	$P_{\text{наг}} = 5,5 \text{ МПа}$ $P_{\text{вс}} = 3,8 \text{ МПа}$	$P_{\text{наг}} = 7,5 \text{ МПа}$ $P_{\text{вс}} = 5,1 \text{ МПа}$
500	1,6–2,0	2,2–2,7
600	2,6–3,2	3,4–4,1
700	3,8–4,5	4,9–6,0
800	5,2–6,4	6,9–8,4
1000	9,2–11,2	12,1–14,8
1200	14,6–17,8	19,3–23,5
1400	21,5–26,4	28,4–34,7

Максимальная суточная производительность согласно [1] составляет для тех же условий  $Q_{сут} = 92,2 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{сут}$ , при этом расхождение с результатами [10] не превышает 1 %.

Подставив результаты, полученные соответственно в (15) и (16), в (8), получим:

$$Q_{сут} \geq Q_{сут}^{KB} = (77,8 \div 93,2) \cdot 10^6 > 65,12 \cdot 10^6.$$

Таким образом, условие (8) квадратичного режима течения потока газа выполняется.

Тогда для рассматриваемого примера значение коэффициента гидравлического сопротивления составит:

$$\lambda = 0,03817/1387^{0,2} = 0,00898.$$

Другой способ вычисления коэффициента  $\lambda$  рекомендуется в работе [7]:

$$\lambda = 0,067 \left( \frac{158}{Re} + \frac{2k_{ш}}{d_{вн}} \right)^{0,2}, \quad (17)$$

где  $k_{ш} = 0,03 \text{ мм}$ ;

$d_{вн}$  — в мм;

Re — число Рейнольдса, определяемое из выражения [1], которое видоизменится, если  $Q_{сут}$  подставлять в  $\text{м}^3/\text{сут}$ :

$$Re = 17,75 \cdot 10^{-3} \frac{Q_{сут} \Delta}{d_{вн} \mu_g}. \quad (18)$$

Подставив полученные значения в (18), можно определить число Рейнольдса:

$$Re = 17,75 \cdot 10^{-3} \frac{(77,8 \div 93,2) \cdot 10^6 \cdot 0,562}{1387 \cdot 12,52 \cdot 10^{-6}} = (0,45 \div 0,54) \cdot 10^8.$$

Подставив полученное значение Re в формулу (17), определим коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\lambda = 0,067 \cdot \left( \frac{158}{(0,45 \div 0,54) \cdot 10^8} + \frac{2 \cdot 0,03}{1387} \right)^{0,2} = 0,00912 \div 0,00910.$$

Сравнение результатов расчетов по формулам (7) и (17) показывает, что расхождение вычислений для рассматриваемого примера составляет 1,2 %, а для труб диаметром свыше 1420 мм не превышает 2,4 %. Однако трудоемкость расчетов по выражению (7) несравненно ниже, чем по (17). Кроме того, расхождение вычислений, полученных по (7) со значениями, рекомендованными в [1], для рассматриваемого примера составляет 3,3 %, а в диапазоне давлений до 15 МПа не превышает 5,1 %, что позволяет

принять формулу (7) к использованию для дальнейших расчетов.

Следующим параметром, который необходимо определить при расчете потерь давления  $\Delta P$  (см. формулу (6)) на рассматриваемом участке, является плотность газа  $\rho_r$  при рабочем давлении. Этот параметр можно получить из уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$PV = (M_r/m_r) RTZ, \text{ или } PV = M_r R_r TZ,$$

если учесть, что

$$R_r = R/m_r \quad (19)$$

и

$$M_r = \rho_r V, \quad (20)$$

где  $V$  — объем газа.

С учетом этого

$$\rho_r = \frac{P_n}{R_r T_n Z^{cp}}. \quad (21)$$

Тогда удельная газовая постоянная  $R_r$  для природного газа определится из (19):

$$R_r = 8314/16,302 = 510,0 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Подставив соответствующие значения в (21) с учетом (19), получим:

$$\rho_r = \frac{7,14 \cdot 10^6}{510 \cdot 283,15 \cdot 0,9521} = 51,93 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Скорость потока газа  $w$  в начале рассматриваемого участка газопровода определяется из выражения [5]:

$$w = G/(\rho_r f), \quad (22)$$

где  $f$  — площадь поперечного сечения трубы,  $\text{м}^2$ ;

$$f = 0,785 d_{вн}^2;$$

$G$  — массовый расход газа в единицу времени,  $\text{кг}/\text{с}$ ; при нормальных условиях ( $\rho_n = 0,702 \text{ кг}/\text{м}^3$  при  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $P_a = 0,1013 \text{ МПа}$ )

$$G = Q_{год} \rho_n / t_n; \quad (23)$$

$t_n$  — пересчетный временной коэффициент;

$$t_n = 31,536 \cdot 10^6.$$

Тогда получим:

$$G = (28,4 \div 34,7) \cdot 10^9 \cdot 0,702 / (31,536 \cdot 10^6) = 632,19 \div 772,43 \text{ кг}/\text{с}.$$

С учетом этого скорость потока газа исходя из (22) составит:

$$w = (632,19 \div 772,43) / (51,93 \cdot 0,785 \cdot 1,387^2) = 8,06 \div 9,84 \text{ м}/\text{с}.$$

Тогда потери давления на рассматриваемом участке газопровода между КС1 и КС2 длиной  $L = 120 \text{ км}$  определяются из (6) следующим образом:

$$\Delta P = 0,00898 \cdot \frac{120 \cdot 10^3}{1,387} \cdot 51,93 \cdot \frac{(8,06 \div 9,84)^2}{2} =$$

$$= 1,31 \div 1,95 \text{ МПа.}$$

Подставив полученные значения  $\Delta P$  в (5), получим давление в конце рассматриваемого участка  $P_k$ :

$$P_k = 7,14 - (1,31 \div 1,95) = 5,83 \div 5,19 \text{ МПа.}$$

Теперь можно определить давление в точке разрыва газопровода, подставив рассчитанное значение  $P_k$  в (3):

$$P_0 = \sqrt{7,14^2 - [7,14^2 - (5,83 \div 5,19)^2] \cdot 60/120} =$$

$$= 6,52 \div 6,24 \text{ МПа.}$$

Этот параметр позволяет вычислить среднее давление  $P_1^{cp}$  на первом аварийном участке по формуле (2):

$$P_1^{cp} = \frac{2}{3} \left[ 7,14 + \frac{(6,52 \div 6,24)^2}{7,14 + (6,52 \div 6,24)} \right] = 6,83 \div 6,71 \text{ МПа.}$$

2-й аварийный участок (АУ-2)

Среднее давление на 2-м аварийном участке определится из формулы

$$P_2^{cp} = \frac{2}{3} \left( P_0 + \frac{P_k^2}{P_0 + P_k} \right), \quad (24)$$

где  $P_0$  — давление в начале 2-го аварийного участка, равное давлению в точке разрыва;

$$P_0 = 6,52 \div 6,24 \text{ МПа;}$$

$P_k$  — давление в конце 2-го аварийного участка;

$$P_k = 5,83 \div 5,19 \text{ МПа.}$$

Тогда

$$P_2^{cp} = \frac{2}{3} \left[ (6,52 \div 6,24) + \frac{(5,83 \div 5,19)^2}{(6,52 \div 6,24) + (5,83 \div 5,19)} \right] =$$

$$= 6,18 \div 5,73 \text{ МПа.}$$

Полученные значения параметров  $P_1^{cp}$  и  $P_2^{cp}$  позволяют вычислить массу газа, находившегося в аварийных участках газопровода фиксированной длины (между КС или между линейными кранами) до его аварийного разрыва.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО Газпром 2-2.3-351–2009. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО “Газпром” : распоряжение ОАО “Газпром” от 30.03.2009 г. № 83; введ. 30.12.2009 г. — М. : ОАО “Газпром Экспо”, 2009. — 377 с.
2. ГОСТ Р 12.3.047–98. Пожарная безопасность технологических процессов. — Введ. 01.01.2000 г. — М. : Изд-во стандартов, 1998. — 77 с.
3. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : утв. приказом МЧС РФ № 404 от 10.07.2009 г.; зарег. в Минюсте РФ 17.08.2009 г., рег. № 14541; введ. 10.07.2009 г. (прил.: приказ МЧС РФ № 649 от 14.12.2010 г.). — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. — Система “Консультант Плюс Проф”.
4. РД 03-409–01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливоздушных смесей (с изм. и доп.) : постановление Госгортехнадзора РФ от 26.06.2001 г. № 25; введ. 26.06.01 г. — М. : НТЦ “Промышленная безопасность”, 2001. — 24 с.
5. ГОСТ 30319.1–96. Газ природный. Методы расчета физических свойств / Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации : протокол № 9–96 от 12.04.1996 г.
6. Сухарев М. Г., Карасевич А. М. Технологический расчет и обеспечение надежности газо- и нефтепроводов. — М. : Нефть и газ, 2000. — 209 с.
7. ОНТП 51-1–85. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Часть 1. Газопроводы : приказ Минпрома СССР № 255 от 29.10.85 г. — М. : Мингазпром, 1986.
8. Гайер В. Г., Дулин В. С., Заря А. Н. Гидравлика и гидропривод : учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Недра, 1991. — 331 с.
9. Котляр И. Я., Пиляк В. М. Эксплуатация магистральных газопроводов. — Л. : Недра, 1971. — 248 с.
10. Белицкий В. Д., Ломов С. М. Проектирование и эксплуатация магистральных газопроводов. — Омск : ОмГТУ, 2011. — 62 с.

Материал поступил в редакцию 25 сентября 2014 г.

## PARAMETER DEFINITION OF THE AVERAGE GAS PRESSURE IN THE SECTION OF THE PIPELINE

**БЫКОВ А. И.**, Leading Engineer of LLC "Gazprom transgaz Ukhta"  
(Lenina Avenue, 39/2, Ukhta, 169300, Komi Republic;  
e-mail address: abykov@sgp.gazprom.ru)

### ABSTRACT

Parameter of medium pressure  $P^{cp}$  is required, for example, to estimate the mass of natural gas involved in the formation of a fiery torch in case of emergency destruction of the main pipeline. However, the methodology for a systematic calculation of this parameter in the current methodological and normative documents, the author has not found.

Despite the apparent simplicity of the problem, the analysis has shown that the parameter  $P^{cp}$  depends primarily on the performance  $Q_{гп}$  of pipeline, the pressure  $P_H$  at the beginning of the emergency area and the pressure  $P_0$  at the point of the destruction of the pipeline, which in turn are determined by the dependencies from the pressure  $P_K$  in the end of emergency site, the relationship of the lengths  $L_1/L$  emergency areas, inner diameter  $d_{вн}$  of the pipeline, it's the roughness  $k_{гп}$ , the hydraulic resistance coefficient  $\lambda$ , the gas flow velocity  $w$ , it's the density in the working  $\rho_{гс}$  in the normal  $\rho_H$  and in the standard conditions  $\rho_c$ , and more than twenty parameters characterizing the state of a gas in terms of its transport and depressurization of the pipeline. In some cases there is no justification of the calculated transitions, for example, to calculate the final pressure  $P_{к2}$  gas at the second site crash in the presence of data for the initial pressure  $P_{H1}$  first site crash. Calculations of these parameters regulated in several normative documents, which introduces uncertainty in the choice of the calculation scheme and is accompanied by the production of different calculation results.

Calculations of other parameters recommended by the standard methods are complex, three-dimensional routine, require access to specialized software products that are not available in the current engineering activities.

The subjects of this article are refinement of these problems, the rationale for the recommended design solutions and adapting them in a simple, systematic methodology for calculating the average pressure at different sections of the main pipeline.

**Keywords:** emergency section of the main pipeline; mass of gas; average gas pressure.

### REFERENCES

1. Standard of organization Gazprom 2-2.3-351-2009. Guidelines for conducting risk analysis of hazardous production facilities gas transmission companies of JSC "Gazprom". Moscow, JSC Gazprom Ekspo Publ., 2009. 377 p. (in Russian).
2. State Standard 12.3.047-98. Fire safety of technological processes. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1998. 59 p. (in Russian).
3. Technique of determination of settlement sizes of fire risk on production objects. Order of Emercom of Russia on 10.07.2009 No. 404. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009 (in Russian).
4. Guidance document 03-409-01. A method of estimating the effects of accidental explosions of fuel-air mixtures. Moscow, NTTs Promyshlennaya bezopasnost Publ., 2001. 24 p. (in Russian)
5. State Standard 30319.1-96. Gas natural. Methods of calculation of physical properties. Moscow, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. Protocol No. 9-96 on 12.04.1996. 16 p. (in Russian).
6. Sukharev M. G., Karasevich A. M. *Tekhnologicheskii raschet i obespecheniye nadezhnosti gazonefteprovodov* [Process calculation and reliability of gas and oil pipelines]. Moscow, Neft i Gas Publ., 2000. 209 p.
7. All-Union standards for technological design 51-1-85. Trunk pipelines. Part 1. Gaspipelines. Order of Ministry of Industry of USSR No. 255 on 29.10.85. Moscow, Mingazprom Publ., 1986. 101 p. (in Russian).
8. Gayer V. G., Dulin V. S., Zarya A. N. *Gidravlika i gidroprivod* [Hydraulics and hydraulic drive]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 331 p.
9. Kotlyar I. Ya., Pilyak V. M. *Ekspluatatsiya magistralnykh gazoprovodov* [The operation of gas pipelines]. Leningrad, Nedra Publ., 1971. 248 p.
10. Belitskiy V. D., Lomov S. M. *Proyektirovaniye i ekspluatatsiya magistralnykh gazoprovodov* [The design and operation of gas pipelines]. Omsk, Omsk University Publ., 2011. 62 p.

**М. С. САЙКИН**, канд. техн. наук, доцент, заслуженный изобретатель Российской Федерации, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина (Россия, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, e-mail: saikin@eef.ispu.ru)

**А. В. ТОПОРОВ**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики, ФГБОУ ВПО Ивановский институт ГПС МЧС России (Россия, 153040, г. Иваново, просп. Строителей, 33; e-mail: ironaxe@mail.ru)

**Е. А. ТОПОРОВА**, канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроительного производства, ФГБОУ ВПО Текстильный институт Ивановского государственного политехнического университета (Россия, 153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 21)

УДК 621.318

## ПОВЫШЕНИЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ ВАЛОВ МЕШАЛОК

Приведены разработки конструкций магнитожидкостных герметизаторов вращающихся валов мешалок химических реакторов. Даны рекомендации по использованию конструкционных материалов и магнитных наножидкостей для магнитожидкостных герметизаторов химических реакторов. Показано, что применение магнитожидкостных герметизаторов позволяет исключить утечки реагентов и повысить пожарную безопасность химических реакторов. На основе исследований разработана конструкция герметизаторов для лакокрасочного производства ОАО "Лакокраска" (г. Ярославль).

**Ключевые слова:** пожарная безопасность; химический реактор; магнитожидкостный герметизатор; магнитная наножидкость; постоянный магнит.

### Введение

Получение новых веществ и материалов в химической промышленности связано с использованием реакторов. Химический реактор является основным и наиболее опасным в пожарном отношении элементом технологической цепи любого химического производства. В настоящее время на предприятиях химического машиностроения выпускаются химические реакторы объемом 1, 2, 3, 5, 6, 10, 16, 25, 32 и 50 м<sup>3</sup>. Однако с его увеличением возрастает диаметр вала мешалки.

Герметизация вращающихся валов химических реакторов является актуальной задачей. Это связано прежде всего с жесткими нормами по предельной концентрации вредных веществ в атмосфере цехов химических производств.

Большинство химических реакторов работает при периодической загрузке, а протекание химических реакций происходит лишь при определенных температурах, величина которых определяется энергией активации химических реакций. Для температур до 400 °С справедливо правило Ванг-Гоффа, согласно которому повышение температуры на 10 °С приводит к возрастанию константы скорости хими-

ческой реакции в 2...4 раза. При увеличении температуры повышается пожарная опасность реакторов.

Для герметизации валов химических реакторов применяют торцевые уплотнения, допускающие утечки герметизируемой среды [1], которые могут привести к недопустимой концентрации газов в атмосфере цеха с точки зрения пожароопасности. Кроме того, внутрь реактора попадает атмосферный воздух, что при некоторых технологических процессах может привести к браку продукции и даже взрыву реактора. В связи с этим целесообразно использовать уплотнения, которые обеспечивают полную герметичность вращающихся валов.

Этому требованию удовлетворяют магнитожидкостные герметизаторы (МЖГ), которые относятся к бесконтактным уплотнениям. Они обладают абсолютной герметичностью, малым собственным моментом трения, отсутствием износа, высоким ресурсом работы и простотой технического обслуживания [2]. Принцип действия МЖГ основан на удержании магнитной наножидкости (МНЖ) в рабочем зазоре пондеромоторной силой, которая возникает при взаимодействии магнитного момента единичного МНЖ с неоднородным магнитным полем.



МНЖ представляет собой коллоидный раствор частиц магнетита  $Fe_3O_4$  в жидкости-носителе. Для предотвращения слипания ферромагнитных частиц между собой их покрывают стабилизатором, в качестве которого используют поверхностно-активные вещества (ПАВ). Малый размер частиц (порядка 100 Å) и их тепловое движение препятствуют слипанию и оседанию частиц и обеспечивают устойчивость МНЖ как коллоидной системы.

*Цель работы* — разработка новых конструкций МЖГ для герметизации валов мешалок химических реакторов с учетом технологических и эксплуатационных особенностей, связанных со взрывопожаробезопасностью химических производств.

Экспериментальные исследования проводились с целью оценки работоспособности МНЖ с химически агрессивными средами, теоретические — с целью определения рациональных параметров рабочего зазора и магнитной цепи МЖГ. Для этого использовалось численное моделирование на основе метода конечных элементов.

### Основная часть

Применение МЖГ для герметизации валов мешалок химических реакторов предъявляет дополнительные требования к их конструктивному исполнению. Если для вакуумных МЖГ вопросы взаимодействия МНЖ с уплотняемой средой не рассматриваются, то при герметизации жидких и агрессивных сред их необходимо учитывать.

В отличие от МЖГ, предназначенных для герметизации вращающихся валов вакуумного оборудования, герметизаторы химических реакторов должны надежно эксплуатироваться при воздействии агрессивных сред, повышенных температурах (до 400 °С), осевых и радиальных биениях вала около 1 мм.

Обязательным требованием, предъявляемым к МНЖ при работе с агрессивными средами, является исключение процессов ее смещения и химического взаимодействия с уплотняемой средой. Для выявления этих процессов и определения стойкости МНЖ к воздействию температур и агрессивных сред проводилось сравнение ее физических характеристик до и после термообработки и воздействия агрессивных сред. В качестве физических характеристик использовались плотность, пластическая вязкость, намагниченность, кинетическая и агрегативная устойчивость.

Измерение плотности МНЖ проводилось в соответствии с ГОСТ 18995.1–73. Пластическая вязкость определялась на ротационном вискозиметре согласно ГОСТ 26581–85. Намагниченность устанавливалась дифференциально-баллистическим методом. Кинетическая и агрегативная устойчивость МНЖ в неоднородном магнитном поле оценивалась в соответствии с методиками ТУ.

Проведены термоиспытания МНЖ Ф1-20 и С1-20В [3] в статике и динамике при температуре 150 °С. Для термоиспытаний в статике использовался сушильный шкаф, температура внутри которого поддерживалась с помощью электроконтактного термометра. Термоиспытания в динамике проводились в однозубцовом макете МЖГ. Контроль температуры осуществлялся с помощью термопары, установленной на полюсе герметизатора.

Статические и динамические испытания МНЖ показали, что МНЖ С1-20В в процессе контакта с органическими растворителями выдерживает действие лишь ацетона. При взаимодействии со всеми остальными растворителями имеет место коагуляция, на что указывают изменения во всех измеренных физико-химических характеристиках (плотность, пластическая вязкость, намагниченность, агрегативная и кинетическая устойчивость). МНЖ типа Ф1-20 устойчива к воздействию не только гексана, хлороформа, толуола, ацетона, этилацетата, но и таких высокоактивных растворителей, как N,N-диметилформамид и тетрагидрофуран.

На следующем этапе работы изучалось влияние этих сред на стойкость МНЖ в течение 300 ч при 150 °С. Для изучения стойкости МНЖ к воздействию высоких температур и агрессивных сред при работе в составе МЖГ химических реакторов была выбрана МНЖ на фторированной основе Ф1-20.

В целях ограничения воздействия агрессивных сред разработана конструкция МЖГ с защитным элементом, который выполнен в виде гидравлического затвора обратного типа, что позволяет защитить МНЖ от контакта с агрессивной средой. Все элементы гидрозатвора, контактирующие с агрессивной средой, выполнены из фторопласта. В качестве запорной жидкости используются малоиспаряемые химически стойкие жидкости, что позволяет исключить воздействие агрессивной среды и тепловых потоков реактора непосредственно на детали МЖГ и МНЖ.

МЖГ надежно работают только при условии, что уплотняемый зазор выполнен с высокой точностью. Валы реакторов, как правило, имеют биения, многократно превышающие допустимые для МЖГ, поэтому прямая герметизация вала реактора невозможна, необходимо устройство, компенсирующее эти биения. Обычно оно выполняется на основе упругих элементов — сильфонов или резин. Для решения данной задачи сильфоны не подходят, так как не обеспечивают требуемый ресурс из-за ограниченного допустимого числа боковых деформаций (обычно около 1 млн., после чего происходит механическое разрушение сильфона). Поэтому разработаны устройства развязки от биений вала на основе резины в виде колец, которые крепятся к валу и гер-

метизируются фторопластовыми уплотнителями. Для уменьшения воздействия тепла, поступающего от вала, вмонтировано тепловое сопротивление лабиринтного типа, снижающее температуру в месте установки резиновых колец. Таким образом, исключается перегрев резиновых колец, воспринимающих и компенсирующих биения вала. Одно из них воспринимает аксиальную, а другое — радиальную составляющую биений.

Конструкция магнитного узла МЖГ для вала мешалки химического реактора должна обладать рядом специальных требований, а именно: иметь простое устройство; полную защиту постоянных магнитов от контакта с химически активной средой; обеспечивать быстрый доступ к постоянным магнитам, их монтаж и демонтаж. Это позволит изменять количество магнитов в МЖГ и использовать магниты с разными энергетическими характеристиками, тем самым регулируя величину индукции магнитного поля в рабочем зазоре герметизатора.

Классическая конструкция МЖГ (рис. 1) представляет собой магнитный узел. МНЖ 1 находится в рабочем зазоре  $\delta$ , образованном между валом 2 и полюсными приставками 3, между торцевыми поверхностями которого находится постоянный магнит 4.

Недостаток классической конструкции МЖГ — отсутствие возможности замены постоянных магнитов и изменения их количества без ее демонтажа и разборки. В модернизированной конструкции МЖГ [4] (рис. 2) такая возможность предусмотрена.

Модернизированная конструкция МЖГ состоит из магнитного узла, включающего в себя постоянный магнит 1 и две полюсные приставки, concentрически охватывающие вал. Одна из полюсных приставок является внешней и выполнена составной, причем одна из ее частей 2 примыкает к торцевой поверхности постоянного магнита 1, а другая часть 3 образует рабочий зазор  $\delta_1$  с вращающимся валом 4. Вторая полюсная приставка 5 — внутренняя, примыкает к торцевой поверхности постоянного магнита 1 и образует рабочий зазор  $\delta_2$  с вращающимся валом. Между полюсными приставками находится немагнитопроводная втулка 6. Рабочие зазоры  $\delta$  заполнены МНЖ 7.

В МЖГ могут применяться постоянные магниты в форме колец, намагниченные в осевом направлении, или наборные магниты, например, в форме пластин.

При работе МЖГ основной магнитный поток  $\Phi_\delta$  замыкается по пути: постоянный магнит 1 — части внешней составной полюсной приставки 2 и 3 — рабочий зазор  $\delta_1$  — вал 4 — рабочий зазор  $\delta_2$  — внутренняя полюсная приставка 5 — постоянный магнит 1 — и образует замкнутую магнитную цепь.

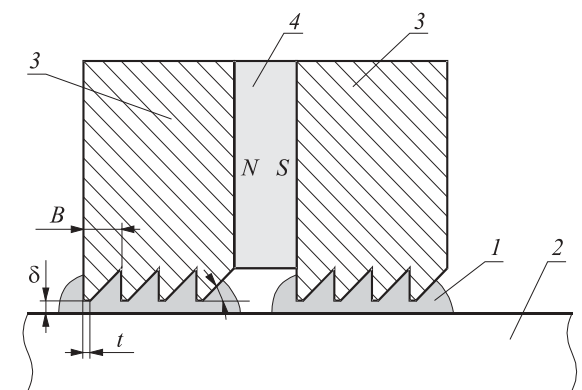


Рис. 1. Классическая конструкция МЖГ

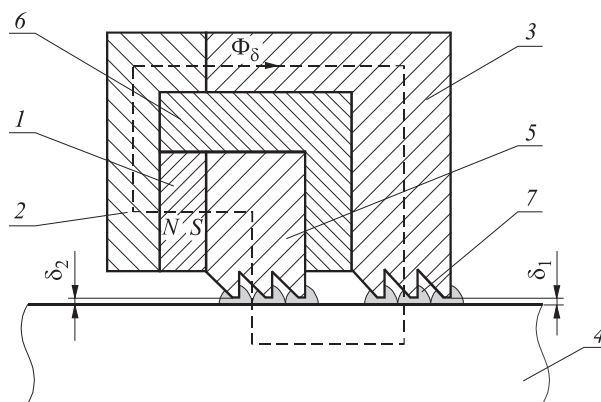


Рис. 2. Модернизированная конструкция МЖГ

МНЖ 7 взаимодействует с полем постоянного магнита и удерживается в рабочих зазорах  $\delta_1$  и  $\delta_2$  ponderомоторной силой, образуя препятствие для прохождения герметизируемой среды.

Конструктивная особенность модернизированного МЖГ (см. рис. 2) состоит в том, что часть 2 внешней полюсной приставки имеет возможность быстрого монтажа и демонтажа. Это позволяет регулировать эксплуатационные характеристики МЖГ за счет изменения параметров магнитного поля в рабочих зазорах  $\delta_1$  и  $\delta_2$  при применении магнитов с разными энергетическими характеристиками и выбирать наиболее рациональный эксплуатационный режим.

Предлагаемая конструкция МЖГ позволяет полностью исключить контакт постоянных магнитов с уплотняемой средой, что особенно важно при герметизации валов реакторов для защиты от агрессивных сред.

Критический перепад давлений МЖГ пропорционален максимальному значению индукции в рабочем зазоре, которая, в свою очередь, зависит от остаточной индукции постоянного магнита. При повышении температуры происходит уменьшение последней, а следовательно, и критического перепада давлений. Поэтому для МЖГ, предназначенных для герметизации валов химических реакторов, должны применяться магниты, изготовленные из “закрити-

ческих” материалов с высокой температурной стабильностью. Кроме того, применение таких магнитов позволяет уменьшить массогабаритные параметры МЖГ. В качестве рекомендуемых целесообразно применять магниты из сплава самарий – кобальт марок КС37, КС25 и магниты на основе сплава неодим – железо – бор марки Ч36Р [5, 6]. Оценки коррозионной стойкости магнитов не требуется, так как конструкция МЖГ обеспечивает их защиту от химического воздействия уплотняемой среды.

Большинство химических реакторов имеет верхний привод вала, поэтому полюсные приставки, вал и корпус МЖГ будут взаимодействовать с парами агрессивной среды химического реактора. Это может приводить к различным видам электрохимической коррозии конструктивных элементов уплотнения [7, 8]. Оценка коррозионной стойкости проводилась по 10-балльной шкале, причем наибольшую стойкость проявляют металлы с оценкой “1”.

В качестве материала корпуса могут использоваться немагнитные стали марок Х18Н9, Х18Н9Т, Х18Н10, Х18Н10Т или титан марок ВТ5-1, ВТ6С, ВТ14. Для прокладок и шайб можно применять фторопласты марок Ф-4, Ф-4Д, Ф-40, Ф-42 [9].

Для элементов магнитной цепи МЖГ должны применяться стали, имеющие, кроме высокой коррозионной стойкости, достаточную индукцию магнитного насыщения (1,6–1,8 Тл) [10]: 08Х13, 12Х13, 15Х28, 20Х13, 30Х13, 40Х13. Выбор того или иного материала следует производить в соответствии с данными по его коррозионной стойкости к уплотняемой среде. Следует отметить, что коррозионная стойкость сталей обычно повышается с улучшением чистоты обработки поверхности. Такие стали устойчиво работают при температурах от 20 до 60 °С при невысоких и средних концентрациях азотной кислоты (20–60 %) и высоких концентрациях серной кислоты (90–100 %). Кроме того, коррозионной стойкостью к этим кислотам обладают стали ХН55БЮ, ХН40МДТЮ, 06ХН28МДТ. К воздействию фосфорной кислоты при ее различных концентрациях устойчивы стали марок 08Х17Т, 15Х28 при температурах до 60 °С, Х18Н9Т и Х18Н10Т — до 100 °С, при концентрации 40 % — стали марок 12Х18Н10Т, 02Х18Н11, 10Х17Н13М3Т при температурах до 100 °С. Стали Н70МФВ-ВИ, 08Х21Н6М2Т обладают коррозионной стойкостью при температурах до 140 °С при различных концентрациях соляной кислоты.

Кроме того, многие из вышеперечисленных сталей обладают коррозионной стойкостью к органиче-

ским кислотам. Например, к уксусной кислоте при концентрации до 50 % и температуре до 50 °С устойчивы стали марок 08Х13, 12Х17, 08Х17Т. К уксусной кислоте любой концентрации устойчивы стали 15Х28, 15Х25Т, ХН50НБЮ при температурах до 50 °С, при концентрации до 80 % — стали Х18Н9Т и Х18Н10Т при температурах до 100 °С.

Приведенные данные показывают, что каждая из сталей обладает коррозионной стойкостью лишь в определенном диапазоне концентраций и температур для различных сред. Поэтому для унификации МЖГ по коррозионной стойкости к большому числу агрессивных сред необходимо введение защитных конструктивных элементов. Кроме того, большинство сталей обладает коррозионной стойкостью лишь при температурах до 100 °С, поэтому для обеспечения их работоспособности в течение длительного времени должна быть предусмотрена система охлаждения.

Численные исследования МЖГ проводились на основе метода конечных элементов [11]. Исходными данными при проектировании уплотнения являлись: диаметр вала, скорость его вращения, рабочий перепад давлений. Агрессивность среды, высокая температура и требуемый ресурс работы не менее 1 года учитывались выбором повышенного коэффициента запаса по давлению, равного 2. При рабочем перепаде давлений 100 кПа критический перепад давлений МЖГ должен составлять 200 кПа. В процессе расчета определялись геометрические размеры системы, выбор марки и размеров магнита.

Проведены расчеты МЖГ на диаметры уплотняемых валов мешалок 95 и 110 мм для химических реакторов объемом 6 и 10 м<sup>3</sup>. В результате расчетов определены размеры постоянных магнитов и геометрические размеры зубцовой зоны.

Проведенные исследования МНЖ и МЖГ позволили разработать конструкцию герметизатора на химические реакторы объемом 6 и 10 м<sup>3</sup> для лакокрасочного производства ОАО “Лакокраска” (г. Ярославль).

## Выводы

Применение МЖГ в химических реакторах позволило исключить утечки реагентов и повысить взрыво- и пожаробезопасность оборудования, снизить брак продукции, улучшить экологическую обстановку в цехах химических предприятий, уменьшить загрязнение окружающей среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельник В. А. Торцовые уплотнения валов : справочник. — М. : Машиностроение, 2008. — 320 с.
2. Орлов Д. В., Михалев Ю. О., Мышкин Н. К. и др. Магнитные жидкости в машиностроении / Под ред. Д. В. Орлова, В. В. Подгоркова. — М. : Машиностроение, 1993. — 272 с.

3. Курченков А. Г. Магнитные жидкости — новый эффективный материал // Механизация и автоматизация. — 1990. — № 4. — С. 34–35.
4. Патент на полезную модель 113325 Российская Федерация, МКИ F16J 15/54. Магнитожидкостное уплотнение / Сайкин М. С., Морозова Д. Ю., Федорова О. Е. — Оpubл. 10.02.2012 г., Бюл. № 4.
5. Пятин Ю. М. Постоянные магниты : справочник. — М. : Энергия, 1980. — 488 с.
6. Сайкин М. С. Особенности выбора постоянных магнитов для магнитожидкостных герметизаторов технологического оборудования // Вестник научно-промышленного общества. — М. : Изд-во “АЛЕВ-В”, 2004. — Вып. 7. — С. 15–19.
7. Томашов Н. Д., Чернова Г. П. Теория коррозии и коррозионно-стойкие конструкционные сплавы. — Л. : Химия, 1988. — 460 с.
8. Сайкин М. С., Бобко Л. А. Особенности выбора конструкционных материалов и магнитных жидкостей для МЖУ химических аппаратов // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции “Состояние и перспективы развития электротехнологии”, VI Бенардосовские чтения. — Иваново, 1992. — С. 132.
9. Журавлев В. Н., Николаева О. И. Машиностроительные стали : справочник. — М. : Машиностроение, 1992. — 480 с.
10. Константинов В. В. Магнитная технологическая оснастка. — М. : Энергия, 1974. — 367 с.
11. Сайкин М. С. Особенности конечно-элементного моделирования электромеханических магнито-жидкостных герметизаторов // Сборник докладов научного семинара, посвященного 200-летию открытия электрической дуги В. В. Петровым и 160-летию со дня рождения Н. Н. Бенардоса “Электротехника и прикладная математика”. — Иваново, 2003. — С. 42–44.

*Материал поступил в редакцию 13 октября 2014 г.*

English

## CHEMICAL MANUFACTURING FIRE SAFETY INCREASING BY USING OF MAGNETIC FLUID SEALS OF MIXERS SHAFTS

**SAYKIN M. S.**, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Honored Inventor of the Russian Federation, Assistant Professor of Electric Engineering Theoretical Base and Electrotechnologies Department, Ivanovo State Power Engineering University named after V. I. Lenin (Rabfakovskaya St., 33, Ivanovo, 153003, Russian Federation; e-mail address: saikin@eef.ispu.ru)

**TOPOROV A. V.**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer of Mechanics and Engineering Graphics Department, Ivanovo Institute of State Fire Service of Emercom of Russia (Stroiteley Avenue, 33, Ivanovo, 153040, Russian Federation; e-mail address: ironaxe@mail.ru)

**TOPOROVA E. A.**, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Machine-Building Technology Department, Textile Institute of Ivanovo State Polytechnic University (Sheremetevskiy Avenue, 21, Ivanovo, 153000, Russian Federation)

### ABSTRACT

The most fire dangerous in the chemical industry is connected with the chemical reactors. Chemical reagents leaking from chemical reactor can cause fire or explosion. Therefore, mixers rotating shafts of chemical reactors sealing is an important task. Mechanical seals used for this purpose operate with the leakages that decrease fire and explosion safety. Magnetic fluid seals have absolute leak tightness, low friction torque, no wear, long service life and ease of maintenance. Chemical reactors seals should operate reliably when exposed to corrosive environments, high temperature (up to 400 °C), about 1 mm axial and radial shaft runouts. The results of the research showed that the magnetic nanofluid type F1-20 (based on the organofluorine liquid) is resistant not only to the hexane, chloroform, toluene, acetone, ethyl acetate, but such potent solvents as N,N-dimethylformamide and tetrahydrofuran. Also, magnetic nanofluid type F1-20 successfully passed the temperature test for 300 hours at 150 °C. To limit the aggressive environment influence on magnetic fluid seal parts the seal with a protective element in the form of a reverse type hydraulic valve has been designed.

It is proposed to install magnetic fluid seal in special rubber bushings to compensate shaft runout. Designed special magnetic system allows to isolate the permanent magnet from the aggressive environment. Special magnetic system also permits to regulate magnetic induction in the seal air gap to obtain optimal performances and the magnetic fluid durability. The investigations allowed us to develop new design of magnetic fluid seals for mixers shafts 95 and 110 mm diameter of chemical reactors 6 and 10 m<sup>3</sup>. Designed seals were made and installed on chemical reactors of paint production company “Lakokraska” (Yaroslavl). Installed magnetic fluid seals eliminated reactants leakages and as a consequence increased fire and explosion safety of the production.

**Keywords:** fire safety; chemical reactor; magnetic fluid seal; magnetic nanofluid; permanent magnet.

## REFERENCES

1. Melnik V. A. *Tortsovyye uplotneniya valov: spravochnik* [Mechanical shaft seals. Handbook]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2008. 320 p.
2. Orlov D. V., Mikhaylov Yu. O., Myshkin N. K. *Magnitnyye zhidkosti v mashinostroyenii* [Magnetic fluids in engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1993. 272 p.
3. Kurchenkov A. G. Magnitnyye zhidkosti — novyy effektivnyy material [Magnetic fluids as a new effective material]. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya — Mechanization and Automization*, 1990, no. 4, pp. 34–35.
4. Saykin M. S., Morozova D. Yu., Fedorova O. E. *Magnitnozhidkostnoye uplotneniye* [Magnetic fluid seal]. Patent RF, no. 113325, 10.02.2012.
5. Pyatin Yu. M. *Postoyannyye magnity: spravochnik* [Permanent magnets. Handbook]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 488 p.
6. Saykin M. S. Osobennosti vybora postoyannykh magnitov dlya magnitnozhidkostnykh germetizatorov tekhnologicheskogo oborudovaniya [The permanent magnets choice for technological equipment magnetic fluid seals]. *Vestnik nauchno-promyshlennogo obshchestva — Scientific-Industrial Society Bulletin*. Moscow, ALEV-V Publ., 2004, issue 7, pp. 15–19.
7. Tomashov N. D., Chernova G. P. *Teoriya korrozii i korrozionno-stoykiye konstruksionnyye splavy* [Structural alloys corrosion theory and corrosion-resistant alloys]. Leningrad, Khimiya Publ., 1988. 460 p.
8. Saykin M. S., Bobko L. A. Osobennosti vybora konstruksionnykh materialov i magnitnykh zhidkostey dlya MZhU khimicheskikh apparatov [Selection features of structural materials and magnetic fluids for chemical devices magnetic fluid seals]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii”, VI Benardosovskiye chteniya* [Abstracts of the International scientific-technical conference “State and prospects of Electrotechnology development”, VI Benardos reading]. Ivanovo, 1992, p. 132.
9. Zhuravlev V. N., Nikolaeva O. I. *Mashinostroitelnyye stali: spravochnik* [Engineering steels. Handbook]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1992. 480 p.
10. Konstantinov V. V. *Magnitnaya tekhnologicheskaya osnastka* [Technology magnetic tools]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 367 p.
11. Saykin M. S. Osobennosti konechno-elementnogo modelirovaniya elektromekhanicheskikh magnitnozhidkostnykh germetizatorov [Finite element modeling features of the electromechanical performance of the magnetic fluid seals]. *Sbornik dokladov nauchnogo seminar, posvyashchennogo 200-letiyu otkrytiya elektricheskoy dugi V. V. Petrovym i 160-letiyu so dnya rozhdeniya N. N. Benardosa “Elektrotekhnika i prikladnaya matematika”* [Collected reports of the scientific seminar dedicated to the 200<sup>th</sup> anniversary of the electric arc discovery by V. V. Petrov and the 160<sup>th</sup> anniversary of the birth of N. N. Benardos “Electrical Engineering and Applied Mathematics”]. Ivanovo, 2003, pp. 42–44.

**И. Т. СЕВРЮКОВ**, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций (Россия, 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, 7)

**В. В. ИЛЬИН**, канд. техн. наук, доцент кафедры программного обеспечения, вычислительной техники и автоматизированных систем, Пермский военный институт внутренних войск МВД РФ (Россия, 614112, г. Пермь, ул. Гремячий Лог, 1; e-mail: ilin.vad12@inbox.ru)

**В. В. КОЗЛОВ**, д-р техн. наук, профессор кафедры программного обеспечения, вычислительной техники и автоматизированных систем, Пермский военный институт внутренних войск МВД РФ (Россия, 614112, г. Пермь, ул. Гремячий Лог, 1)

УДК.622.61

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ХРАНЕНИЯ БОЕПРИПАСОВ

Формулируется задача по управлению безопасностью при хранении боеприпасов в условиях неопределенности. Рассматривается рассредоточенная группа боеприпасов как многокомпонентная система и факторы риска возникновения аварийной ситуации. Предложена общая стратегия управления безопасностью хранения боеприпасов. Сформулирована задача оперативного управления безопасностью хранения боеприпасов с целью предотвращения возникновения аварийных ситуаций и их развития. Проанализированы возможности минимизации ущерба от аварийной ситуации.

**Ключевые слова:** хранение боеприпасов; аварийная ситуация; факторы риска; управление безопасностью; минимизация ущерба.

Задача оперативного управления безопасностью хранения боеприпасов заключается в своевременном выявлении опасностей и причин их возможного иницирования, осуществлении управленческих решений, направленных на их устранение и предотвращение дальнейшего развития аварийной ситуации. Это задача управления безопасностью в условиях неопределенности. Неопределенности обусловлены, во-первых, причинами иницирования боеприпасов  $P'_j$ , во-вторых, неопределенностью перехода иницирования  $j$ -го боеприпаса в аварийную ситуацию  $S_j$ , в-третьих, неопределенностью, связанной с тем, что неясно, к какой аварийной ситуации приведет иницирование  $j$ -го боеприпаса.

Рассмотрим рассредоточенную группу боеприпасов (далее — РГБ) как многокомпонентную систему. В рамках методологии теории систем любой объект управления можно рассматривать как систему, под которой в наиболее общем случае понимают [1]:

$$W_{oy} = DVCG_{oy}T_{oy}UZ, \quad (1)$$

где  $W_{oy}$  — декартово произведение множеств;

$D$  — множество компонентов системы рассредоточенной группы боеприпасов ( $d \in D$ );

$V$  — множество внутренних и внешних возмущающих воздействий на РГБ ( $v \in V$ );

$$V = \{v_T^{BH}, v_{6n}^{BH}, v_T, v_{6n}\}, \quad (2)$$

$v_T^{BH}, v_{6n}^{BH}$  — внутренние воздействия соответственно на технологическое оборудование и систему РГБ;

$v_T, v_{6n}$  — внешние воздействия соответственно на технологическое оборудование и систему РГБ;

$C$  — множество параметров состояния элементов  $D$  (системы РГБ) ( $c \in C \cap C \subset D$ ), при этом  $C \supset X \cap C \supset D$ ;

$X$  — показатели безопасности РГБ;

$G_{oy}$  — множество отображений  $g_{oy}$ , осуществляемых на  $D, V, C$ ;

$G_{oy} = \{g_{oy} | g_{oy} \in D \cap g_{oy} \in V \cap g_{oy} \in C\}$ ;

$T_{oy}$  — множество отношений  $t_{oy}$  над элементами  $D, V, C$ ;

$T_{oy} = \{t_{oy} | t_{oy} \in D \cap t_{oy} \in V \cap t_{oy} \in C\}$ ;

$U$  — множество управляющих параметров ( $u(t) \in U$ );  $U = \{u_T, u_{6n} | u_T \in U_T \cap u_{6n} \in U_{6n}\}$ ;

$u_T$  — элементы множества управляющих воздействий на технологическое оборудование  $U_T$ ;

$u_{6n}$  — элементы множества управляющих воздействий на РГБ  $U_{6n}$ ;

$Z$  — параметры РГБ, определяющие ее состояние;

$Z = \{z_T, z_{6n} | z_T \in Z_T \cap z_{6n} \in Z_{6n}\}$ ;

$z_T$  — элементы множества состояний технологического оборудования  $Z_T$ ;

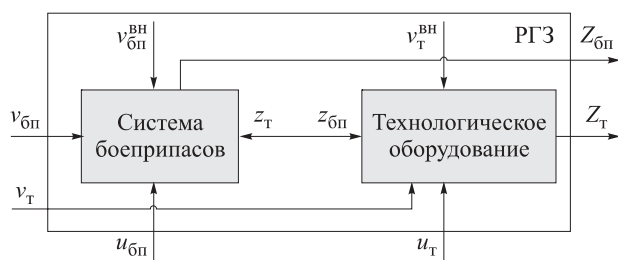


Рис. 1. Модель объекта управления (РГБ)

$z_{бп}$  — элементы множества состояний системы РГБ  $Z_{бп}$ .

В результате управления безопасностью РГБ должно быть достигнуто такое функционирование объекта (рис. 1), при котором показатель безопасности  $X$  при воздействиях  $V$  будет максимально приближен к требуемому значению  $X_0$ .

Подсистемы в составе объекта управления (РГБ) осуществляют следующие отображения:

$$G_{Z_{бп}}: v_{бп} \times v_{бп}^{BH} \times z_{т} \times u_{бп} \rightarrow Z_{бп};$$

$$G_{Z_{т}}: v_{т} \times v_{т}^{BH} \times z_{бп} \times u_{т} \rightarrow Z_{т},$$

где  $z_{бп}$ ,  $z_{т}$  — множества, определяющие взаимодействие системы боеприпасов и технологического оборудования.

Для того чтобы управлять системой боеприпасов, необходимо принимать и реализовывать соответствующие управленческие решения  $P$ , которые определяются поступающими от системы информационными сигналами  $Z$ , т. е. [2]:

$$P = F(Z). \quad (3)$$

На практике информационный сигнал  $Z$  о состоянии системы поступает дискретно, через определенные промежутки времени, либо в виде вербального сообщения, получаемого при визуальном осмотре, снятии показаний с контрольно-измерительных приборов, или данных систем диагностирования.

Факторы риска возникновения аварийной ситуации при хранении боеприпасов имеют ряд особенностей. Первая заключается в том, что отдельные аварийные ситуации в системе РГБ, соответствующие наихудшим возможным сценариям развития аварии, могут быть вызваны как внешними, так и внутренними причинами.

Второй отличительной особенностью является возможность многовариантности развития аварийной ситуации. Так, отдельные факторы риска могут не только иметь дальнейшее развитие с более тяжелыми последствиями, но и непосредственно приводить к тому или иному виду риска с меньшими экологическими и социальными последствиями.

Третья особенность заключается в том, что некоторые причинно-следственные связи не считают-

ся жесткими. Они могут иметь или не иметь место в зависимости от аварийной ситуации. Для формализации причинно-следственных связей в процессе анализа и оценки риска в работе рассматриваются вероятностные модели оценки. Стратегия управления безопасностью хранения РГБ представлена на рис. 2.

Оптимальное управление безопасностью хранения РГБ прежде всего связано с обоснованием оптимального значения показателя риска аварии и должно включать [3]:

- анализ опасных явлений, связанных с хранением РГБ, и разработку математических моделей с последующим подтверждением их адекватности;
- выявление критичных процессов в общей схеме развития аварийной ситуации в РГБ;
- определение методов воздействия на систему РГБ и синтез алгоритмов управления с последующей проверкой эффективности влияния управления на развитие аварийной ситуации;
- мониторинг состояния системы и прогнозирование развития аварийной ситуации.

Задача оперативного управления безопасностью хранения РГБ должна решаться путем анализа всех возможных аварийных ситуаций и сценариев их развития. В соответствии с этим управление безопасностью хранения РГБ заключается в реализации следующих основных стадий управления:

- решение по недопущению иницирующих воздействий на боеприпасы;
- решение по ликвидации причин воздействия на боеприпасы;
- предотвращение цепного процесса развития аварийной ситуации.

Формализованная постановка задачи оперативного управления безопасностью хранения РГБ, т. е. предотвращения возникновения аварийных ситуаций и их развития, приводящих к  $k$ -му виду риска, может быть сформулирована как задача минимизации ущерба  $k$ -го вида в результате аварийной ситуации при обеспечении приемлемого или допустимого значения различных видов рисков:

$$(\bar{u}^z)^* = \text{Arg min } (Y^{kz}(\bar{x}^z, \bar{d}^z, M, F_{ij}, Z^z)) \in T.$$

Минимизация возможного ущерба от аварийной ситуации в общем случае достигается за счет принятия управляющих решений  $(\bar{u}^z)^*$ , обеспечивающих:

- поддержание в заданных диапазонах значений параметров условий хранения боеприпасов  $\bar{x}^z$  в  $z$ -м хранилище в соответствии с конструктивными особенностями боеприпасов  $\bar{d}^z$  и предотвращение их выхода за пределы установленных значений;
- уменьшение массы  $M$  опасных, диспергированных, горючих и легковоспламеняющихся веществ,



Рис. 2. Стратегия управления безопасностью хранения РГБ

поступивших в окружающее пространство, путем оперативного принятия решений по управлению безопасностью [4];

- уменьшение количества поражающих факторов  $n$ , масштабов их воздействий различного вида  $F_{ij}$  и сценариев развития аварии, что обеспечивается организацией правильных действий в ЧС (эвакуация персонала, обеспечение средствами защиты), а также на стадиях проектирования и реконструкции сооружений для хранения боеприпасов;
- минимизацию затрат  $Z^z$  на ликвидацию последствий ущерба в результате аварии, что достигается за счет принятия оперативных управляющих решений.

Оптимизируемой переменной в задаче оптимального управления безопасностью хранения РГБ является вектор управляющих решений по управле-

нию безопасностью на всех этапах возникновения и развития аварийной ситуации.

В целом оптимальное управление безопасностью хранения РГБ предусматривает:

- анализ опасных явлений, связанных с хранением РГБ, и составление математической модели с последующим подтверждением адекватности аналитических выражений модели путем проведения вычислительного эксперимента;
- выявление критичных процессов в общей схеме развития аварийной ситуации;
- определение методов воздействия на систему хранения РГБ и синтез алгоритмов управления ее безопасностью с последующей проверкой эффективности влияния управления на развитие аварийной ситуации;
- собственно процесс управления, базирующийся на мониторинге состояния системы и прогнозировании развития аварийной ситуации.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров А. Ф., Савицкая Т. В., Михайлова П. Г. Модели и методы решения задач оперативного управления безопасностью непрерывных химико-технологических систем // Моделирование систем. — 2005. — № 6. — С. 50–54.
2. Севрюков И. Т., Козлов В. В. Принципы сопоставления, выбора и совместимости поражающих факторов многофакторного поля поражения // Оборонная техника. — 2009. — № 7. — С. 41–45.
3. Пампуро В. И. Оптимальное управление безопасностью АЭС и вероятностный анализ риска // НАН Украины. — 2001. — № 5. — С. 185–191.
4. Акимов В. А., Лесных В. В., Радаев Н. Н. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. — М.: Деловой экспресс, 2004. — 302 с.

Материал поступил в редакцию 22 сентября 2014 г.

English

## FORMALIZATION OF THE MODEL OF THE SAFETY MANAGEMENT SYSTEM OF STORAGE OF AMMUNITION

**SEVRYUKOV I. T.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Science Worker of Russian Federation, Chief Researcher, All-Russian Research Institute on Problems of Civil Defense and Emergency Situations (Davydkovskaya St., 7, Moscow, 121352, Russian Federation)

**ILYIN V. V.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Software, Computer Facilities and Automated Systems Department, Perm Military Institute of Internal Troops of Ministry of Internal Affairs of Russian Federation (Gremyachiy Log St., 1, Perm, 614112, Russian Federation; e-mail: ilin.vad12@inbox.ru)

**KOZLOV V. V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Software, Computer Facilities and Automated Systems Department, Perm Military Institute of Internal Troops of Ministry of Internal Affairs of Russian Federation (Gremyachiy Log St., 1, Perm, 614112, Russian Federation)

### ABSTRACT

The article formulates the task of managing security when storing ammunition under conditions of uncertainty. Uncertainties relate, first, to the reasons for the initiation of ammunition ( $P'_j$ ), secondly with the uncertainty of the transition of the  $j^{\text{th}}$  initiation munition in emergency ( $S_j$ ), the third with the uncertainty of what emergency would initiate the  $j^{\text{th}}$  munition. It is discussed distributed group of munitions as multicomponent system and risk factors of emergency situations, which have a range of features. The first is that separate accidents, the worst possible scenarios of development of the accident might be caused by external causes and consequences of internal causes, a second is the multi development emergency and third-part cause and effect is not rigid, and may or may not occur depending on the emergency situation. A common strategy for storage of ammunition safety management is proposed. Objective operational storage of ammunition safety management, prevention of accidents and their development is formulated. It is analyzed possibility to minimize damage from a disaster.

**Keywords:** storage of ammunition; emergency; risk factors; manage security; minimizing damage.

### REFERENCES

1. Egorov A. F., Savitskaya T. V., Mikhaylov P. G. Modeli i metody resheniya zadach operativnogo upravleniya bezopasnostyu nepreryvnykh khimiko-tekhnologicheskikh sistem [Models and methods for solving operational security management continuous chemical-technological systems.]. *Modelirovaniye sistem — Modeling Systems*, 2005, no. 6, pp. 50–54.
2. Sevryukov I. T., Kozlov V. V. Printsipy sopostavleniya, vybora i sovmestimosti porazhayushchikh faktorov mnogofaktornogo polya porazheniya [Principles matching, selection and compatibility of the damaging effects of multifactor field destruction]. *Oboronnaya tekhnika — Defense Technique*, 2009, no. 7, pp. 41–45.
3. Pampuro V. I. *Optimalnoye upravleniye bezopasnostyu AES i veroyatnostnyy analiz riska* [Optimal management of nuclear plant safety and probabilistic risk analysis]. NAN Ukraine, 2001, no. 5, pp. 185–191.
4. Akimov V. A., Lesnykh V. V., Radaev N. N. *Osnovy analiza i upravleniya riskom v prirodnoy i tekhnogennoy sferakh* [Fundamentals of analysis and risk management in natural and technological spheres]. Moscow, Delovoy Ekspres Publ., 2004. 302 p.

**П. И. ГАВТУНЯК**, инженер, генеральный директор ООО “Газпром Газобезопасность” (Россия, 117939, г. Москва, ул. Строителей, 8, корп. 1; e-mail: P.gaftuniak@adm.gazprom.ru)

**В. Е. ГУЛЬЦЕВ**, инженер, начальник Уренгойского военизированного отряда ООО “Газпром Газобезопасность” (Россия, 117939, г. Москва, ул. Строителей, 8, корп. 1); аспирант Тюменского государственного нефтегазового университета (Россия, 625038, г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, 38)

**В. В. ЖУРАВЛЕВ**, инженер, заместитель начальника Управления капитального строительства ООО “Газпром Добыча Надым” (Россия, 629730, г. Надым, ул. Кедровая, 8А); аспирант Тюменского государственного нефтегазового университета (Россия, 625038, г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, 38; e-mail: Zhuravlev.VV@nadyam-dobycha.gazprom.ru)

**А. В. КУСТЫШЕВ**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Тюменский государственный нефтегазовый университет (Россия, 625038, г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, 38; e-mail: Kustishev@tngg.info)

**Л. У. ЧАБАЕВ**, д-р техн. наук, профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Тюменский государственный нефтегазовый университет (Россия, 625038, г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, 38)

УДК 622.279.51/.7(571.1)

## ОСОБЕННОСТИ ЛИКВИДАЦИИ ОТКРЫТОГО ГАЗОВОГО ФОНТАНА НА ГЛУБОКОЙ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНОЙ СКВАЖИНЕ

Показано, что обеспечение пожарной и противofонтанной безопасности нефтегазовых скважин является важнейшей задачей при разработке месторождений углеводородного сырья, особенно при поиске новых запасов нефти и газа. Показано также, что при отсутствии достоверной геологической информации вскрываемых эксплуатационных объектов на первый план выходит проблема обеспечения фонтанной безопасности не только процесса бурения, но и процессов вскрытия и опробования всех имеющихся в разрезе объектов.

**Ключевые слова:** фонтанирующая скважина; ликвидация горящего фонтана; газопроявление; выброс; газожидкостная смесь; запорно-устьева сборка.

### Введение

На месторождениях Западной Сибири постоянно ведутся поисково-разведочные работы по поиску новых залежей нефти и газа, которые удаляются все дальше на север — в труднодоступные, необжитые места. В связи с тем что буровые работы ведутся там в условиях недостаточной изученности геологического разреза, высока вероятность возникновения на скважинах аварий, газопроявлений и даже открытых газонефтяных фонтанов. На особенностях подобных аварий и их ликвидации остановимся подробнее.

Такие скважины являются опасными производственными объектами, поэтому на их примере можно рассматривать характерные для этой категории скважин аварии, перерастающие в открытый фонтан, и технические приемы их ликвидации.

*Цель работы* — выявить основные причины аварий, присущих поисково-оценочным скважинам в условиях Крайнего Севера, и оценить возможность ликвидации аварий, переросших в открытое фонтанирование.

В основе методов исследования лежит анализ причин возникновения аварии на одной поисково-оценочной скважине, характерной для всех скважин этой категории, их обобщение и систематизация, выработка тактических приемов ликвидации открытых газовых фонтанов, возникающих на скважинах этой категории в условиях удаленности территории, бездорожья и сурового климата Арктики.

### Место возникновения аварии

Полуостров Ямал, где в настоящее время производится бурение поисково-оценочных скважин, является частью Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области и расположен за Полярным кругом. Протяженность полуострова с юга на север от пос. Панаевский до мыса Скуратова составляет почти 670 км, а с запада на восток в средней (наиболее широкой) части — около 250 км. Естественной южной границей Ямала является широтный отрезок долины реки Обь, ограниченный на востоке Обской губой, а на севере и западе — Карским морем и Байдарачкой губой. Эта огромная по площади террито-

рия, простирающаяся от лесотундры на юге до арктической тундры на севере, является одним из наиболее труднодоступных, малонаселенных и малоосвоенных районов Западной Сибири [1].

Полуостров Ямал — плоская, в разной степени расчлененная низменная равнина, абсолютные отметки которой изменяются от нескольких метров на побережьях Карского моря и Обской губы до 80–95 м в осевой части полуострова и до 100–120 м в его приуральских районах. На большей площади равнина более или менее четко террасирована. Наибольшая густота расчленения характерна для севера и запада полуострова. Здесь плоская в общем плане поверхность глубоко изрезана густой речной и молодой овражной сетью с резкими, почти каньонообразными формами. Глубина эрозионного вреза на большей части территории водораздельных равнин составляет 30–50 м, а в пределах возвышенных участков наиболее древней равнины — 50–70 м.

Реки полуострова относятся к бассейну Карского моря и его заливов — Байдарацкой и Обской губ. Наиболее крупными реками, впадающими непосредственно в Карское море, являются Яхадыха, Холехя, Харасавэй. Южнее в Байдарацкую губу впадают реки Ясовейяха, Юрибей и Байдарата, а в Обскую — Хабейяха, Тамбей, Яхадыха. На самом юге территория полуострова Ямал прилегает к низовьям реки Обь. Здесь в нее впадают реки южного Ямала — Хадьгатаха, Щучья, Харвута и др. Все реки типично равнинные, поэтому для них характерны небольшие уклоны долин и скорости течения, значительная извилистость русел. Большинство рек имеют широкие (до 10 км), корытообразные, плоские и заболоченные долины. Большая часть площади речных долин занята поймой.

Почти вся территория Ямала интенсивно заозерена, особенно южная часть полуострова. Большинство озер термокарстового происхождения, небольшие и мелкие (глубиной до 2–4 м). Широко распространены старичные озера (старицы) в поймах рек. Большая часть территории заболочена: обычны арктические минеральные и торфяно-минеральные болота, на юге полуострова — плоско-бугристые комплексы.

Осваиваемый район полуострова отличается суровым климатом с продолжительной (до 9 мес) холодной зимой и прохладным летом. Среднегодовые температуры воздуха по наблюдениям метеостанций Нового Порта и Мыса Каменного составляют минус 10 °С. Преобладающая основная температура наиболее холодных месяцев (январь – февраль) — минус 22 °С (абсолютный минимум — минус 57 °С). Полярный день длится примерно 68 сут, полярная ночь — 45 сут. Снег выпадает в конце сентября – октябре, а сходит в начале июня. Максималь-

ная мощность снежного покрова в понижениях рельефа достигает 4 м к концу апреля. Зимой наблюдаются полярные сияния, сопровождаемые магнитными бурями. Летняя (июль – август) дневная температура обычно не превышает 11...13 °С (абсолютный максимум — 30 °С). Среднеголетние значения суммы выпавших осадков составляют 446 мм (пос. Мыс Каменный) и 451 мм (пос. Новый Порт). Весной и летом преобладают северные и северо-восточные ветры, а осенью и зимой — южные и юго-западные, со средней скоростью 5–10 м/с, временами — более 25 м/с. В формировании температурного режима полуострова большое значение имеет открытость территории, способствующая как свободному проникновению холодного арктического воздуха с севера, так и выносу прогретых воздушных масс с юга на север, что приводит к резким перепадам температуры в течение года и даже суток.

Такие климатические условия оказывают существенное влияние на организацию производства буровых работ, график и режим работы буровых бригад. Здесь требуется повышенное внимание к трудовой дисциплине персонала, к соблюдению технологических приемов работы, к внимательности и оперативности инженерно-технического персонала, руководящего технологическим процессом. Несоблюдение этих условий может привести к авариям и даже открытым фонтанам.

### Условия возникновения аварии

На момент возникновения аварии на скважине, относящейся к категории поисково-оценочных, закончено бурение и начаты работы по опробованию (испытанию) объектов эксплуатации.

При опробовании одного из объектов методом перфорации (перфорация VIII объекта, пласт АУ 10) произошел выброс, при устранении которого разрушилась глухая плашка, что привело к открытому фонтанированию скважины с последующим возгоранием.

Конструкция скважины типична для испытаний глубоких скважин на юрские отложения. Кондуктор диаметром 426 мм спущен на глубину 415 м, что на 135 м выше проектной отметки, при этом осталась непокрытой подошва многолетнемерзлых пород (ММП), что могло явиться одной из причин смятия обсадных колонн в зоне мерзлых пород. Первая промежуточная колонна диаметром 324 мм спущена на проектную глубину 1250 м; вторая промежуточная колонна диаметром 245 мм — почти на проектную глубину 3296 м, на 4 м выше проектной отметки. Потайная колонна диаметром 194 мм установлена в интервале 2786–3393 м. Эксплуатационная колонна диаметром 140 мм спущена практически на проектную глубину 3599 м.

Устье скважины оборудовано колонной головкой ОККЗ-70-168×245×324×426К1-ХЛ с установленной на ней трубной головкой, входящей в комплект фонтанной арматуры АФ6-80/65×70 К1-ХЛ, и двухплашечным превентором 2ППР 180×70, оснащенным трубными плашками диаметром 73 мм и глухими плашками такого же типоразмера. Устьевое оборудование опрессовано совместно с верхней частью эксплуатационной колонны в интервале 0–2108 м на давление 20,3 МПа. По результатам испытаний скважина признана герметичной. В указанном интервале она была заполнена солевым раствором СГС-18 плотностью 1050 кг/м<sup>3</sup>, разработанным ОАО «СевКавНИПИгаз».

Перед проведением прострелочно-взрывных работ (ПВР) эксплуатационная колонна (как это делается всегда) была прошаблонирована на диаметр 89 мм, а затем — проперфорирована в интервале 1806–1825 м зарядом ЗПК89-АТ-М-04.

Следует отметить, что во время спуска перфоратора в рассматриваемую скважину отсутствовал обязательный контроль за объемом вытесняемого из нее раствора, что в конечном счете и привело к аварии. Долив недостающего раствора в скважину осуществлялся при подъеме перфоратора до отметки 50 м от устья через задавочную трубную линию цементировочным агрегатом ЦА-320, после чего членами геофизического отряда проводился осмотр перфоратора. При этом контроль полноты долива скважины солевым раствором проводился визуально — по переливу жидкости через верх плашечного превентора, что является грубейшим нарушением техники безопасности. Результатом этого стало отсутствие точных данных уровня жидкости в скважине, загрязнение рабочей площадки и высокая вероятность получения травм обслуживающим персоналом.

Таким способом были проведены шесть спуско-подъемных операций с перфоратором. При этом контроль объема раствора, долитого в скважину, и его плотности также отсутствовал.

После проведения седьмого спуска, срабатывания и отстрела перфоратора стал осуществляться его подъем. Начиная с глубины 1000 м были начаты работы по доливу раствора в скважину. При нахождении перфоратора на глубине 650 м был отмечен перелив раствора через превентор и провисание каротажного кабеля. Для его устранения скорость подъема инструмента была увеличена до 6000 м/ч, но, несмотря на принятые меры, спустя несколько секунд перелив раствора перешел в фонтанирование до высоты ротора буровой установки. Это повлекло за собой выброс из скважины с огромной скоростью геофизического кабеля и перфоратора с каротажным кабелем. При закрытии в аварийной ситуа-

ции глухих плашек превентора произошло неполное закрытие и разрушение одной из плашек, что привело к открытому фонтанированию скважины. Причиной разрушения плашки явилось возникновение в превенторе избыточного давления, из-за того что в процессе ускоренного закрытия глухих плашек персонал забыл открыть задвижку на факельную линию для сброса избыточного давления. Это может свидетельствовать о растерянности обслуживающего персонала в экстремальной ситуации и плохом знании им положений аварийного расписания в случае возникновения нефтегазопроявлений.

### Тактические приемы ликвидации открытого газового фонтана

Для ликвидации аварии согласно аварийному расписанию [2] было перекрыто движение постороннего транспорта по подъездной дороге к фонтанирующей скважине. На скважину прибыла оперативная группа противofонтанной службы, были определены границы опасной зоны, проведено обследование устья скважины и территории опасной зоны. После прибытия пожарных расчетов, дислоцированных вблизи фонтанирующей скважины, начались работы по расчистке подходов к устью скважины [3]. В связи с большой загазованностью на устье скважины (в силу того что фонтанирующая струя дробилась об элементы конструкции основания буровой установки) были начаты работы по расшивке основания буровой установки для открытия задвижек на отводы противовыбросового оборудования (ПВО).

В этот момент произошло возгорание фонтанирующей струи и падение вышки буровой установки. Несмотря на горящий факел на устье скважины, работы по разбору и растаскиванию с него металлоконструкций и емкостного парка были продолжены при постоянном орошении объекта работ с целью снижения температуры нагреваемого под воздействием пламени оборудования и создания водяной завесы, препятствующей дальнейшему распространению пожара (рис. 1) [4, 5].

Далее стали проводиться работы по доставке и размещению возле устья скважины специального оборудования противofонтанной службы для ликвидации фонтана.

Для определения возможности глушения скважины и прекращения поступления газа из пласта была выполнена оценка возможности управления задвижками трубной головки на фонтанирующей горячей скважине и проведена сборка задавочной линии, через которую в скважину был закачан некоторый объем воды для определения приемистости пласта. Подача воды в скважину осуществлялась тремя насосными установками с максимальной про-



Рис. 1. Растаскивание металлоконструкций и оборудования с устья скважины

изводительностью. Резка металлоконструкций и растаскивание оборудования от устья скважины осуществлялись с помощью мобильного лазерного технологического комплекса МЛТК-20 при постоянном орошении устья лафетными стволами для создания водяной завесы. Благодаря этому удалось создать на устье скважины компактную струю газа (рис. 2).

После определения приемистости подача воды в скважину была прекращена. Перед монтажом запорно-устьевого сборки (ЗУС) на устье горячей скважины была подготовлена тросовая оснастка, состоящая из крановой подвески КП-25 и траверса.



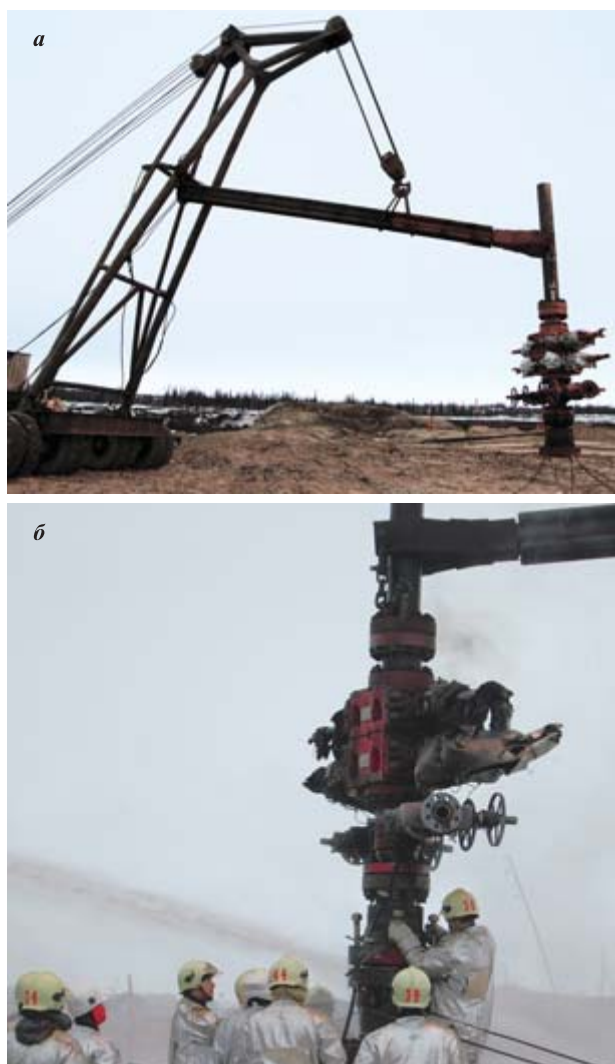
Рис. 2. Создание компактной струи газа на устье скважины

Для снятия ПВО и трубной головки было проведено раскрепление фланцевого соединения трубной головки с верхней катушкой головки обсадной трубы, установка струбцин и тросов, переоснастка КП-25, демонтаж траверсов. После демонтажа трубной головки и аварийного ПВО они были оттащены от устья скважины (рис. 3).

Для наведения на горящее устье скважины ЗУС были установлены направляющие ролики для тросовой оснастки, смонтировано устройство тросовой оснастки, подготовлено соответствующее оборудование. ЗУС с двумя превенторами и газоотводной трубой с помощью тросовой оснастки была наведена на устье скважины под горящим факелом и закреплена на колонной головке. При этом скважина работала через газоотводную трубу (рис. 4) [6–8].



Рис. 3. Демонтаж трубной головки



**Рис. 4.** Наведение ЗУС на устье фонтанирующей скважины с помощью тросовой оснастки (а) и закрепление ее на колонной головке (б)

После наведения ЗУС на устье фонтанирующей скважины и отвода струи горящего пламени на безопасную высоту была смонтирована линия глушения и осуществлено глушение аварийной скважины при постоянном орошении устья (рис. 5) [9].

В процессе глушения в скважину последовательно закачивали: техническую воду плотностью  $1001 \text{ кг/м}^3$  в объеме  $55 \text{ м}^3$ , снизив первоначальное давление  $14,5 \text{ МПа}$  до атмосферного, затем — раствор хлорида кальция ( $\text{CaCl}_2$ ) плотностью  $1260 \text{ кг/м}^3$  в объеме  $23 \text{ м}^3$ , блокирующий раствор с наполнителем Полицелл-ЦФ в объеме  $10 \text{ м}^3$ , раствор СГС-18 плотностью  $1050 \text{ кг/м}^3$  в объеме  $20 \text{ м}^3$ . Причем давление закачки не превышало давления опрессовки технологической колонны труб.

В результате аварийная скважина была заглушена, давление на устье скважины снизилось до атмосферного. На этом работы по ликвидации фонтана были завершены.

После ликвидации фонтана проводятся работы по контролю за скважиной в соответствии с планом работ. В дальнейшем будет приниматься решение либо о ликвидации скважины, либо о продолжении на ней работ по поиску углеводородного сырья.

#### Научная новизна

Новизна работы состоит в следующем:

1) обобщены и систематизированы причины аварий в процессе бурения и вскрытия эксплуатационных объектов поисково-оценочных скважин в условиях Крайнего Севера; предложены конкретные технологические и организационно-управленческие решения по их предотвращению;

2) апробированы новые тактические приемы и технические средства по ликвидации горящего фонтана:



**Рис. 5.** Глушение фонтанирующей скважины при постоянном орошении ее устья

- использование мобильного лазерного технологического комплекса (МЛТК-20) без участия людей для резки металлоконструкций в процессе расчистки устья скважины и подготовки основы для наведения ЗУС;
- лазерная резка металлоконструкций (не применявшаяся ранее), что позволит сократить сроки расчистки устья и повысить безопасность работ на горящем устье без участия людей;
- малогабаритный лазерный технологический комплекс (новый тип устройства для резки металлоконструкций).
- организация процесса наведения запорно-устье-вой сборки с отводным патрубком, отводящим пламя пожара от устья скважины, и подъема его на безопасную высоту в суровых арктических условиях.

### Практическая ценность

Сокращена продолжительность ликвидации фонтана до 16 дней, что является большой заслугой оперативного состава противоданной службы. При ликвидации фонтанов применены новые технологические приемы, которым рабочие противоданной службы обучаются на практике.

### Выводы

Причинами аварии на скважине и последующего возникновения открытого газового фонтана явились:

- 1) халатность персонала, который не следил за доливом промывочной жидкости;
- 2) незнание персоналом практических действий при возникновении нештатных ситуаций, формальное обучение персонала методам ликвидации и предупреждения газонефтеводопроявлений;
- 3) недостаточная квалификация инженерно-технических работников (мастер и технолог должны были пересчитать и проверить соответствие плотности задавочной жидкости условиям проведения перфорационных работ, чего специалисты не сделали, полагаясь целиком на план работ, что является грубым нарушением организации производства и их должностных инструкций и свидетельствует о низком уровне знаний промышленной безопасности техническим персоналом бурового подрядчика);
- 4) пресловутый человеческий фактор (отсутствие должного контроля со стороны инженерно-тех-

нических работников, формальное ведение журналов при смене вахты в условиях труднодоступности места бурения скважины и непредсказуемости метеоусловий (непродолжительное время летной погоды)).

Тем не менее при ликвидации открытого фонтана оправдалось требование по исключению участия человека при расчистке завала металлоконструкций в опасной зоне и сокращение сроков по расчистке устья от металлолома. На данной скважине, взятой в качестве примера, резка металлоконструкций заняла 1 сутки, расчистка устья — 14 дней, глушение скважины — менее суток.

В целом при проведении работ на подобных скважинах необходимо учитывать следующее:

- нельзя проводить работы при отсутствии достоверной геологической информации по скважине;
- в процессе подготовительных работ к ПВР необходимо грамотно выполнять расчет плотности бурового раствора с учетом фактической глубины интервала перфорации;
- в процессе строительства скважины необходимо полностью перекрывать зону многолетнемерзлых пород, что позволит предотвратить возможное смятие обсадных колонн и возникновение фонтана;
- во время спуска и подъема перфоратора необходим постоянный контроль за объемом вытесненного из скважин раствора.

Для повышения надежности строительства скважин, качества контроля за его параметрами и испытания скважин необходимо неукоснительное соблюдение требований правил безопасности, технологий, регламентируемых проектами разработки месторождений и проектом на строительство скважин, требований нормативных документов на испытание скважин.

В заключение следует констатировать, что в результате обобщения и анализа причин возникновения аварии на скважине, перешедшей в открытый газовый фонтан с возгоранием, были предложены оптимальные технологии их ликвидации и выработаны новые мероприятия организационного и управленческого характера, направленные на предотвращение аварийной ситуации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. В 3 т. / Под общ. ред. Ю. К. Васильчука, Г. В. Крылова, Е. Е. Подборного. — Тюмень : ООО «ТюменьНИИгазпрогаз»; СПб. : Недра, 2006.

2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности. Сер. 08, вып. 19. — М. : ЗАО “Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности”, 2013. — 288 с.
3. Гоинс У. К., Шеффилд Р. Предотвращение выбросов / Пер. с англ. — М. : Недра, 1987. — 288 с.
4. Чабаяев Л. У., Кустышев А. В., Зозуля Г. П., Гейхман М. Г. Предотвращение и ликвидация газопроявлений и открытых фонтанов при ремонте скважин в экстремальных условиях Крайнего Севера. — М. : ИРЦ Газпром, 2007. — 189 с.
5. Чабаяев Л. У., Чудновский Д. М., Хлебников С. Р., Аветисов А. Г., Зозуля Г. П., Кустышев А. В., Пуля Ю. А. Фонтаноопасность при бурении, эксплуатации и ремонте скважин. — Краснодар : Изд-во “Просвещение-Юг”, 2009. — 267 с.
6. Пат. 2261982 Российская Федерация. МПК Е 21 В 35/00. Способ ликвидации открытого нефтегазового фонтана / Р. А. Бакеев, А. В. Кустышев, О. В. Сизов, Л. У. Чабаяев. — № 2004117694; заяв. 10.06.2004 г.; опубл. 10.10.2005 г., Бюл. № 28.
7. Бакеев Р. А., Журавлев В. В., Кустышев А. В., Ятлук О. В. Некоторые аспекты ликвидации открытого газоконденсатного фонтана и пожара в удаленных районах Крайнего Севера // Пожарная безопасность. — 2011. — № 1. — С. 126–130.
8. Пат. 92690 Российская Федерация. МПК Е 21 В 35/00. Устройство для наведения отводного патрубка на устье фонтанирующей скважины / Л. У. Чабаяев, А. В. Кустышев, В. Б. Соломахин, Г. П. Зозуля, А. И. Хаджиев, Ж. С. Попова, Д. Н. Яковенко, Л. П. Кустышева, Е. В. Вакорин. — № 2009131812; заяв. 21.08.2009 г.; опубл. 27.03.2010 г., Бюл. № 9.
9. Чабаяев Л. У. Основы стратегии и тактики ликвидации открытых газовых фонтанов // Пожарная безопасность. — 2008. — № 4. — С. 83–85.

*Материал поступил в редакцию 30 октября 2014 г.*

English

## SPECIAL ASPECTS OF OPEN GAS BLOWOUT LIQUIDATION ON A DEEP PROSPECTING AND APPRAISAL WELL

**GAVTUNYAK P. I.**, Engineer, General Director of LLC “Gazprom Gazobesopasnost” (Stroiteley St., 8/1, Moscow, 117939, Russian Federation; e-mail address: P.gaftuniak@adm.gazprom.ru)

**GULTSEV V. E.**, Engineer, Head of the Urengoy Paramilitary Unit, LLC “Gazprom Gazobesopasnost” (Stroiteley St., 8/1, Moscow, 117939, Russian Federation); Postgraduate Student of Tyumen State Oil and Gas University (50 Let Oktyabrya St., 38, Tyumen, 325038, Russian Federation)

**ZHURAVLEV V. V.**, Engineer, Deputy Head of the Capital Construction Department, LLC “Gazprom Dobycha Nadym” (Kedrovaya St., 8A, 629730, Nadym, Russian Federation); Postgraduate Student of Tyumen State Oil and Gas University (50 Let Oktyabrya St., 38, Tyumen, 325038, Russian Federation; e-mail: Zhuravlev.VV@nadym-dobycha.gazprom.ru)

**KUSTYSHEV A. V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RANS, Professor of Drilling Oil and Gas Wells Department, Tyumen State Oil and Gas University (50 Let Oktyabrya St., 38, Tyumen, 325038, Russian Federation; e-mail address: Kustishev@tngg.info)

**CHABAIEV L. U.**, Doctor of Technical Sciences, Member of the International Academy of Sciences Ecology and Life Safety, Professor of Drilling Oil and Gas Wells Department, Tyumen State Oil and Gas University (50 Let Oktyabrya St., 38, Tyumen, 325038, Russian Federation)

### ABSTRACT

Ensuring the fire and blowout safety for oil and gas wells is currently a central task while hydrocarbons field development. It is particularly important during new oil and gas reserves exploration in remote areas in severe climate (arctic) conditions. In this case in the absence of reliable geological data of exploration objects the problem of blowout safety becomes very significant not only during the drilling process but also during the tests of all available formations.

In the article the reasons of frequent blowouts and open burning blowout liquidation techniques with the use of present-day technical equipment applied on a real blowing well are considered. Initially on the burning wellhead the operation of cutting and taking to pieces of drilling rig metal



construction was made with the help of mobile laser technological system. In the fire flame by means of laser cutting the base for shut-off valves targeting was prepared. After that, on the burning wellhead the shutdown assembly was applied with the help of the wire system; due to this assembly the burning flame was removed from the wellhead on a safe altitude. Further the well control equipment was installed on the wellhead under the burning flame, the well was killed and the fire was put out.

**Keywords:** blowing well; burning gas blowout liquidation; gas shows; blowout; liquid-gas mixture; wellhead shutdown assembly operation.

## REFERENCES

1. Vasilchuk Yu. K., Krylov G. V., Podbornyy E. E. (eds.) *Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy poluostrova Yamal* [Cryosphere of oil and gas fields on the Yamal Peninsula]. Tyumen, Tyumen-NIIgiprogaz Publ.; St. Petersburg, Nedra Publ., 2006.
2. Federal rules and regulations in the field of industrial safety. Safety in the oil and gas industry. Ser. 08, Publication 19. Moscow, ZAO "Scientific and Technical Research Center of Industrial Safety" Publ., 2013. 288 p. (in Russian).
3. Goings W. K., Sheffield R. *Predotvrashcheniye vybrosov* [Blowout prevention]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 288 p.
4. Chabaev L. U., Kustyshev A. V., Zozulya G. P., Geikhman M. G. *Predotvrashcheniye i likvidatsiya gazoproyavleniy i otkrytykh fontanov pri remonte skvazhin v ekstremalnykh usloviyakh Kraynego Severa* [Prevention and elimination of gas shows and blowouts in the repair of wells under extreme conditions of the Far North]. Moscow, IRC Gazprom Publ., 2007. 189 p.
5. Chabaev L. U., Chudnovsky D. M., Khlebnikov S. R., Avetisov A. G., Zozulya G. P., Kustyshev A. V., Pulya Yu. A. *Fontanoopasnost pri bureanii, ekspluatatsii i remonte skvazhin* [Well control hazards during drilling, maintenance and repair of wells]. Krasnodar, Prosveshcheniye-Yug Publ., 2009. 267 p.
6. Bakeev R. A., Kustyshev A. V., Sizov O. V., Chabaev L. U. *Sposob likvidatsii otkrytogo neftegazovogo fontana* [Method of elimination of oil and gas blowout]. Patent RF, no. 2261982, 10.10.2005.
7. Bakeev R. A., Zhuravlev V. V., Kustyshev A. V., Yatluk O. V. *Nekotoryye aspekty likvidatsii otkrytogo gazokondensatnogo fontana i pozhara v udalennykh rayonakh Kraynego Severa* [Some aspects of the elimination of gas-condensate blowout and fire in the remote areas of the Far North]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2011, no. 1, pp. 126–130.
8. Chabaev L. U., Kustyshev A. V., Solomakhin V. B., Zozulya G. P., Khadzhiev A. I., Popova Zh. S., Yakovenko D. N., Kustysheva L. P., Vakorin E. V. *Ustroystvo dlya navedeniya otvodnogo patrubka na ustye fontaniruyushchey skvazhiny* [Device for aiming the nozzle at the wellhead of the blowing well]. Patent RF, no. 92690, 27.03.2010.
9. Chabaev L. U. *Osnovy strategii i taktiki likvidatsii otkrytykh gazovykh fontanov* [Fundamentals of strategy and tactics of blowout elimination]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2008, no. 4, pp. 83–85.

**М. В. КРУПИН**, старший преподаватель кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи Академии ГПС МЧС России в составе УНК АСИТ (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: krupin3@yandex.ru)

**А. В. РЯЗАНОВ**, канд. техн. наук, доцент кафедры инженерной экологии техносферы МГТУ МИРЭА (Россия, 119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78)

УДК 681.586.6

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА КИСЛОРОДА

Рассматриваются вопросы измерения концентрации кислорода в газовых смесях и особенности конструкции термомагнитного датчика кислорода. Приводятся результаты экспериментальных исследований по влиянию изменения температуры и давления азотно-кислородной смеси на показания термомагнитного датчика кислорода.

**Ключевые слова:** датчик; кислород; термомагнитная конвекция; микропровод.

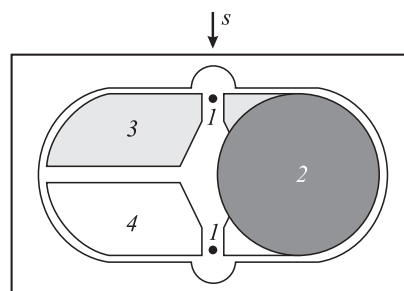
В настоящее время резко возросло значение результатов измерений как источника объективной информации о величинах, характеризующих эффективность и качество производственных процессов, состояние и свойства окружающей среды. В связи с этим к измерительным приборам предъявляются повышенные требования по точности измерений, быстродействию, надежности, массе и габаритным размерам, экономичности питания. Принципы действия основной массы измерительных приборов базируются на работе первичных преобразователей, так как именно первичный преобразователь и основанный на нем датчик, как правило, определяют конструкцию прибора, точность и надежность измерений. Следовательно, разработка усовершенствованных первичных преобразователей, датчиков и измерительных приборов, работающих на их основе, представляет собой актуальную задачу.

В процессе проектирования газоанализатора основным этапом является проведение экспериментов с целью доказать адекватность аналитических соотношений, положенных в основу модели газоанализатора, реальным параметрам узлов прибора. На основании этого утверждения представляется возможным использовать имитационную модель для проведения серии машинных экспериментов в целях определения оптимальных параметров функционально значимых узлов газоанализатора.

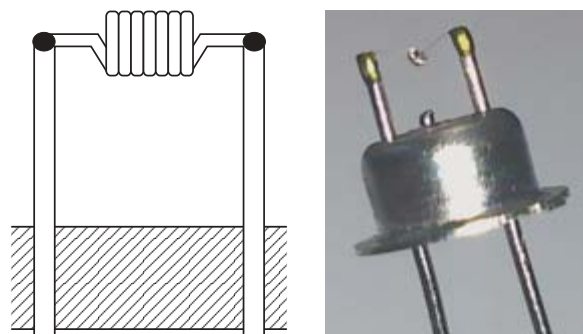
Датчик состоит из двух чувствительных элементов *1* и магнитной системы, в которую входят два постоянных магнита *2*, стальные (*3*) и алюминиевые (*4*) пластины. В качестве постоянных магнитов в эксперименте использовались наиболее распространенные неодимовые магниты толщиной 3 мм и диаметром 18 мм. Вид сверху на базовый вариант магнитной системы без одного из магнитов и замыкающих верхних пластин представлен на рис. 1.

Чувствительный элемент датчика (рис. 2) представляет собой спираль из 5–6 витков из проволоки толщиной 10–12 мкм в сплавленной термостойкой оболочке 1,0–1,5 мкм, сопротивлением 32–36 Ом. Спираль чувствительного элемента приваривается на токопроводящие проводники, установленные в транзисторные стойки. Такой датчик имеет малые (почти точечные) размеры, что позволяет устанавливать их в любое место магнитной системы.

В эксперименте чувствительные элементы устанавливались симметрично в магнитной и немагнитной частях измерительной системы на расстоянии



**Рис. 1.** Базовый вариант магнитной системы без замыкающих верхних пластин



**Рис. 2.** Чувствительный элемент термомагнитного датчика

0,5 мм от внешних краев пластин в середине зазора по толщине, что позволило обеспечить необходимый температурный режим и решить проблему влияния неопределяемых компонентов газов.

На рис. 3 приведены расчетная зависимость напряженности магнитного поля  $H$  (А/м) в воздушном зазоре от осевой координаты  $s$  (см. рис. 1), ее аппроксимация в окрестности максимума и зависимость произведения  $H \cdot dH/ds$  от осевой координаты  $s$  [2].

Из рис. 3 видно, что кривая зависимости произведения  $H \cdot dH/ds$  от осевой координаты  $s$  около максимумов имеет очень крутые характеристики, поэтому необходимо чувствительные элементы располагать в местах, где произведение  $H \cdot dH/ds$  максимально.

Для проведения экспериментов с датчиком термомагнитного газоанализатора был разработан испытательный стенд [2], состоящий из пневматической, силовой и измерительной частей, смонтированных на корпусе. Термомагнитный датчик располагался в герметичной камере, в которой установлен вентилятор для более равномерного перемешивания в ее объеме газовой смеси. Чувствительные элементы соединялись по мостовой схеме. Полезный сигнал снимался с диагонали измерительного моста.

Были проведены опыты по определению влияния температуры газовой смеси на показания термомагнитного датчика при давлении азотно-кислородной газовой смеси 1 атм и питающем напряжении 5 В. Температура газовой смеси изменялась в интервале от минус 30 до 30 °С с шагом 10 °С с помощью камеры тепла-холода КТХ-74. Внешний вид испытательного стенда с камерой тепла-холода типа КТХ-74 представлен на рис. 4.

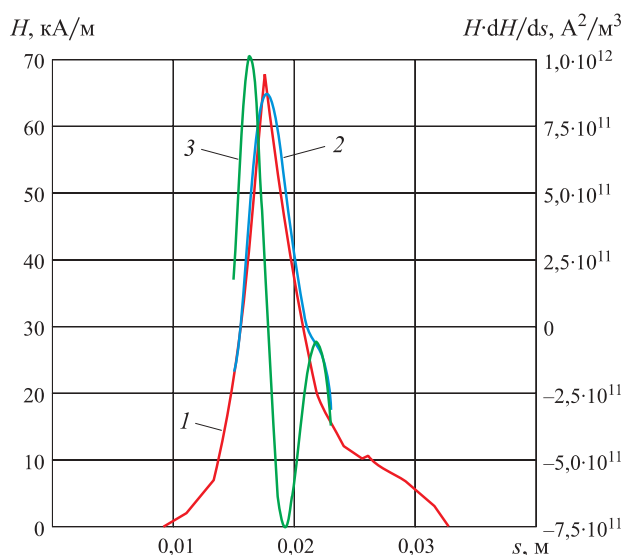


Рис. 3. Расчетные зависимости  $H = f(s)$  для базового варианта магнитной системы: 1 — опыт; 2 — аппроксимация; 3 —  $H \cdot dH/ds$

Была найдена аналитическая формула  $f = y(x)$ , которая аппроксимирует экспериментальную (табличную) зависимость с помощью многочлена первой степени  $y(x) = kx + b$ . Оценка погрешности экспериментальных данных обрабатывалась методом наименьших квадратов. Результаты физического моделирования при изменении концентрации кислорода в азоте от 0 до 100 % в виде графических зависимостей выходного напряжения  $U$  (мВ) измерительного моста от концентрации кислорода  $C$  (% об) при различных значениях температуры газовой смеси представлены на рис. 5.

Кроме того, были проведены опыты по определению зависимости показаний термомагнитного датчика от давления азотно-кислородной смеси при заданной температуре и питающем напряжении 5 В



Рис. 4. Испытательный стенд с камерой тепла-холода типа КТХ-74

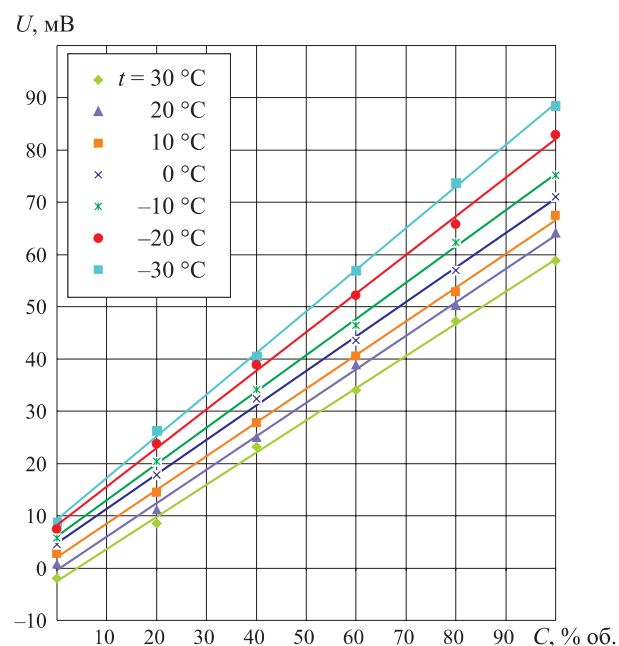


Рис. 5. Экспериментальные данные и их аналитическая зависимость по определению температурных погрешностей



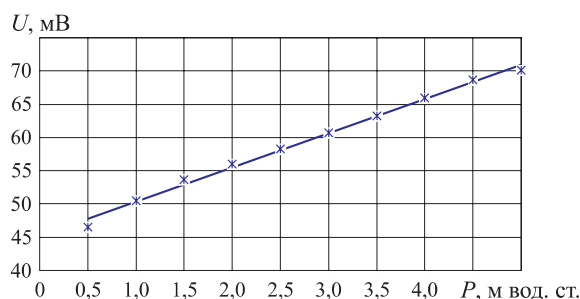
**Рис. 6.** Внешний вид экспериментальной установки по выявлению зависимости показаний термомагнитного датчика от давления газовой смеси с помощью трехотсечной барокамеры в составе глубоководного водолазного комплекса ГВК-250

на экспериментальной установке, представленной на рис. 6.

Зависимость выходного напряжения измерительного моста от давления газовой смеси представлена на рис. 7.

Нормальная жизнедеятельность человека может быть обеспечена поддержанием парциального давления кислорода во вдыхаемом воздухе на определенном уровне. Парциальное давление есть произведение доли газа в газовой смеси на общее давление смеси. Так, при изменении давления газовой смеси в 1,5 раза показания датчика изменяются на столько же. Это говорит о том, что датчик производит измерения парциального давления, что дает возможность применять термомагнитный датчик для определения концентрации кислорода в газовой смеси с точки зрения влияния количества кислорода на физиологические реакции человека. Для измерения просто процентного содержания кислорода надо учитывать давление газа.

Современное состояние аналитического приборостроения характеризуется как большим разнообразием задач газового анализа, так и широким диапазоном требований к условиям работы газоана-



**Рис. 7.** Экспериментальные данные и их аналитическая зависимость по определению барометрической погрешности

лизаторов. Так, к газоанализаторам предъявляются новые требования, такие как длительная работа без обслуживания, минимальная погрешность измерений при больших диапазонах изменения условий эксплуатации (температуры, давления, изменения ускорения свободного падения, большого количества и различия неизмеряемых компонентов). Однако создание универсального, точного, чувствительного, быстродействующего газоанализатора и применение его для решения многих задач газового анализа экономически нецелесообразно. Одним из наиболее рациональных путей является создание газоанализатора с гибкой, программно настраиваемой структурой в зависимости от класса решаемой задачи. При этом некоторая избыточность аппаратных средств компенсируется высоким уровнем унификации, технологичности, что, в свою очередь, наряду с расширением функциональных возможностей газоанализаторов и ростом их номенклатуры, существенно снижает стоимость единицы продукции.

Результаты экспериментальных исследований дают основание утверждать, что термомагнитный датчик является наиболее перспективным для анализа кислорода в широком диапазоне при значительных изменениях температуры и давления газовой смеси и по своим характеристикам превосходит известные образцы сенсоров на кислород. Использование в качестве чувствительного элемента микропиралли из литого микропровода позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики термомагнитных газоанализаторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крутин М. В., Зыков В. И. О термомагнитном принципе детектирования кислорода в газовых смесях // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2012. — № 3. — С. 19–23.
2. Зыков В. И., Крутин М. В., Копылов Н. П., Цариченко С. Г. Стенд для испытаний термомагнитных газоанализаторов кислорода на объектах энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2012. — № 3. — С. 58–63.

Материал поступил в редакцию 15 сентября 2014 г.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THERMOMAGNETIC OXYGEN SENSOR

**KRUPIN M. V.**, Senior Lecturer of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: krupin3@yandex.ru)

**RYAZANOV A. V.**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Moscow State Institute of Radiotechnics, Electronics and Automation (MIREA) (Vernadskogo Avenue, 78, Moscow, 119454, Russian Federation)

### ABSTRACT

By measuring instruments there are increased requirements in terms of accuracy of measurements, performance devices, increase their reliability, reduce weight and dimensions, power saving. The principles of operation of the bulk of instrumentation are based on the work of the primary converters. Thermomagnetic sensor consists of two sensing elements and the magnetic system. The sensing element is a spiral of 5–6 turns of wire with a thickness of 10–12 microns in a thermally fused shell of 1.0–1.5 mm. Such a sensor has a small size, which allows them to be installed in any location of the magnetic system. Sensing elements should be placed in locations where the product  $H \cdot dH/ds$  maximum.

Experiments were carried out to determine the effect of temperature and pressure of nitrogen-oxygen mixture to the testimony of the thermomagnetic sensor at a supply voltage of 5 V. The temperature of the gas mixture was varied in the range from minus 30 to 30 °C in steps of 10 °C with the camera heat-cold KTKh-74. It was found analytical formula  $f = y(x)$ , which approximates the experimental (tabular) dependence using the first-degree polynomial  $y(x) = kx + b$ .

Results of experimental studies give reason to believe that the thermomagnetic sensor is the most promising for the analysis of a wide range of oxygen at high temperature and pressure of the gas mixture and outperforms known examples of sensors for oxygen. Using as a sensing element microspiral of cast microwire can significantly improve the performance of the thermomagnetic analyzers.

**Keywords:** sensor; oxygen; thermomagnetic convection; cast microwire.

### REFERENCES

1. Krupin M. V., Zykov V. I. O termomagnitnom printsipe detektirovaniya kisloroda v gazovykh smesyakh [On the principle of thermomagnetic detection of oxygen in gas mixtures]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya — Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2012, no. 3, pp. 19–23.
2. Zykov V. I., Krupin M. V., Kopylov N. P., Tsarichenko S. G. Stend dlya ispytaniy termomagnitnykh gazoanalizatorov kisloroda na ob'yektakh energetiki [Stand for testing gas oxygen thermomagnetic at energy]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya — Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2012, no. 3, pp. 58–63.

**Д. А. КОРОЛЬЧЕНКО**, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA\_kbs@mgsu.ru)

**Е. Н. ДЕГАЕВ**, аспирант кафедры комплексной безопасности в строительстве Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA\_kbs@mgsu.ru)

**А. Ф. ШАРОВАРНИКОВ**, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA\_kbs@mgsu.ru)

УДК 614.84.664

## ОГNETУШАЩАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕН ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ АЛКИЛСУЛЬФАТОВ НАТРИЯ

Исследована огнетушащая эффективность пены низкой кратности из водных растворов алкилсульфатов натрия. Проведены исследования поверхностной активности водных растворов пенообразователей на границе с гептаном и на основе этих измерений рассчитаны коэффициенты растекания водного раствора по гептану и гептана по раствору. Показано, что поведение пены, полученной из растворов алкилсульфатов, при контакте с горящим гептаном заметно различается. Установлено, что огнетушащая эффективность гомологов в ряду алкилсульфатов натрия коррелирует с поверхностной активностью растворов этих ПАВ на границе с гептаном и воздухом.

**Ключевые слова:** огнетушащая эффективность; водные растворы алкилсульфатов натрия; коэффициент растекания водного раствора по гептану; поверхностная активность растворов ПАВ.

Начиная с 2000 г. особое внимание уделяется замене биологически жестких пенообразователей биоразлагаемыми, которые в меньшей степени наносят ущерб окружающей среде. К группе биологически мягких поверхностно-активных веществ (ПАВ) относятся алкилсульфаты натрия.

Цель данной работы — провести исследования огнетушащей эффективности пены низкой кратности, полученной из водных растворов алкилсульфатов натрия.

Для испытаний огнетушащей эффективности использовали стендовую методику, приведенную в ГОСТ Р 53280.2–2010 [1], а также методику, описанную в работе [2]. Каждое из испытанных веществ исследовалось на выявление поверхностной и межфазной активности на границе с углеводородом — гептаном. Измерения проводились методом отрыва кольца, который также представлен в ГОСТ Р 53280.2–2010 [1].

В качестве членов гомологического ряда использовали: этилгексилсульфат натрия; децилсульфат натрия; лаурилсульфат натрия; смесь алкилсульфатов с числом углеродных атомов 8–10, 12–14 и 12–18.

В настоящей работе сделана попытка сопоставить огнетушащую эффективность пен, полученных из данных веществ, с коэффициентами растекания водных растворов этих же веществ по поверхности гептана.

Учитывая определяющую роль растекания в обеспечении изолирующего действия пены, предварительно проводили исследования поверхностной активности водных растворов пенообразователей на границе с гептаном и на основе этих измерений рассчитывали коэффициенты растекания водного раствора по гептану  $K_{10}$  (мН/м) и гептана по раствору  $K_{01}$  (мН/м). Расчет проводили по известным соотношениям [3]:

$$K_{10} = \sigma_0 - (\sigma_{10} + \sigma_1); \quad (1)$$

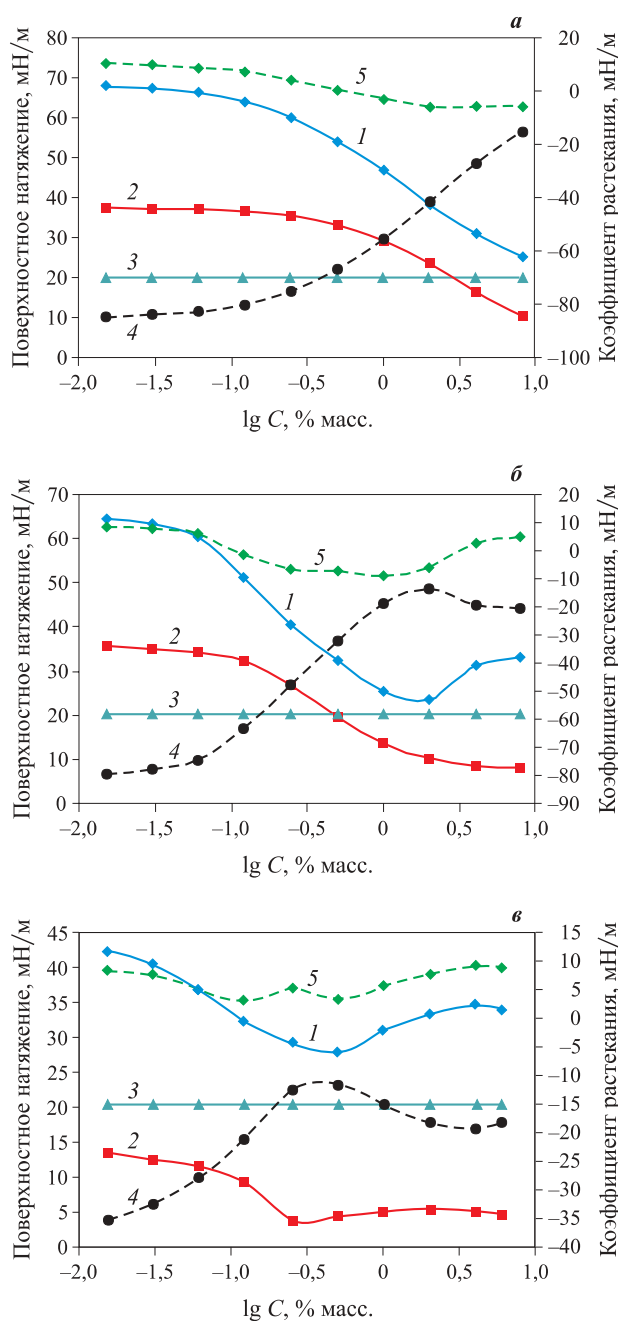
$$K_{01} = \sigma_1 - (\sigma_{10} + \sigma_0), \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  — поверхностное натяжение гептана, мН/м;  
 $\sigma_{10}$  — межфазное поверхностное натяжение на границе с гептаном, мН/м;  
 $\sigma_1$  — поверхностное натяжение водного раствора на границе с воздухом, мН/м.

Результаты комплексных измерений поверхностной активности перечисленных выше ПАВ представлены на рис. 1 и 2.

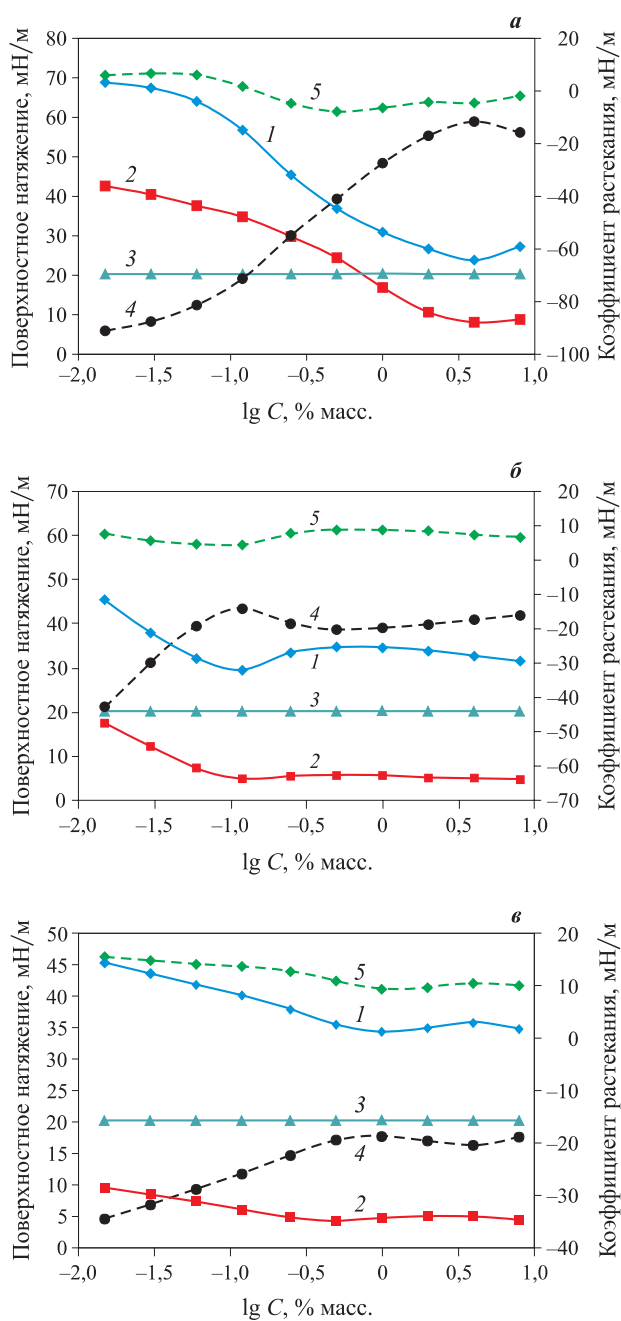
По мере увеличения молекулярной массы ПАВ повышается их поверхностная активность на границе с воздухом и гептаном и коэффициент растекания раствора по горящему постепенно увеличивается, хотя и остается отрицательным.

Поведение пены, полученной из растворов алкилсульфатов, при контакте с горящим гептаном за-



**Рис. 1.** Изотермы поверхностной активности водных растворов этилгексилсульфата (а), децилсульфата (б) и лаурилсульфата (в) натрия: 1 — поверхностное натяжение раствора; 2 — межфазное натяжение; 3 — поверхностное натяжение гептана; 4 — коэффициент растекания раствора по гептану; 5 — коэффициент растекания гептана по раствору

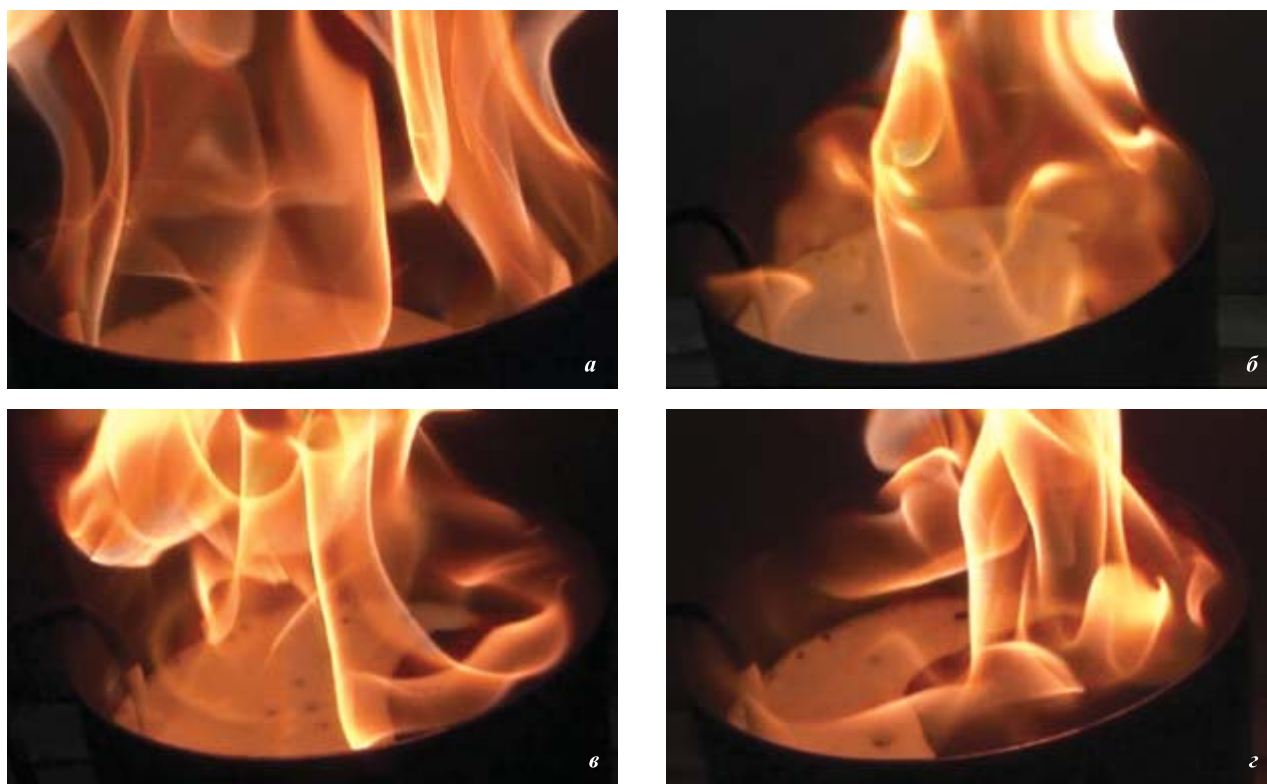
метно различается. Так, пены из растворов этилгексилсульфата натрия — гомолога с наименьшей молекулярной массой — заметно разрушаются по мере их нагревания горячей жидкостью в процессе растекания по горящему гептану (рис. 3). В результате пена, покрыв определенную площадь поверхности гептана в процессе ее подачи, останавливается и постепенно начинает “возвращаться” обратно. На самом деле, происходит прогрессирующее кон-



**Рис. 2.** Изотермы поверхностной активности водных растворов алкилсульфатов с числом углеродных атомов 8–10 (а), 12–14 (б) и 12–18 (в): 1 — поверхностное натяжение раствора; 2 — межфазное натяжение; 3 — поверхностное натяжение гептана; 4 — коэффициент растекания раствора по гептану; 5 — коэффициент растекания гептана по раствору

тактное разрушение пены. В этой ситуации скорость разрушения пены значительно превышает скорость ее подачи на поверхность горячей жидкости. Постепенно поверхность последней освобождается от пены, при этом не происходит даже локализации пламени, поскольку слой пены не достигает противоположного борта.

На этом примере можно отчетливо проследить роль коэффициента растекания. В этом случае вли-



**Рис. 3.** Фрагменты процесса тушения пламени гептана пеной, полученной из водных растворов этилгексилсульфата натрия: *а* — растекание пены по поверхности гептана; *б* — остановка пенного слоя; *в* — движение пены обратно, внутрь слоя; *г* — сокращение площади поверхности гептана, покрытой пеной

яние потока тепла на пену несоизмеримо с контактным разрушением пены, нагретой поверхностью горящего гептана.

Описанная ситуация, которая иллюстрируется фрагментами процесса тушения на рис. 3, показывает, что несмотря на высокую интенсивность подачи пены процесс ее растекания завершается возвратом и полным разрушением пены.

Следующий гомолог — децилсульфат натрия обладает большей поверхностной активностью, а кривые поверхностного натяжения имеют отчетливый перелом в области концентрации, соответствующей критической концентрации мицеллообразования (ККМ) (см. рис. 1, б). Этого перелома на кривых поверхностного натяжения не наблюдалось у предыдущего гомолога. Пена, полученная из растворов децилсульфата натрия, обладала большей контактной устойчивостью, но продвижение пенного слоя по горящему гептану также замедлялось из-за возрастающей скорости ее контактного разрушения.

Зависимость площади, покрытой пеной, от времени ее растекания для пен, полученных из растворов ПАВ, начиная с децилсульфата натрия, имела традиционный вид. Процесс продвижения пены завершался полным покрытием горячей поверхности гептана, вплоть до непосредственного контакта с нагретым бортом резервуара. При этом площадь пламенного горения резко сокращалась: горящими

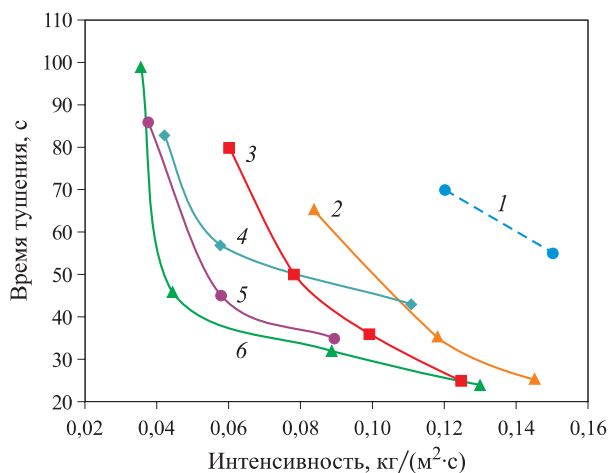
оставались лишь отдельные участки непосредственно около металлических стенок, т. е. имела место локализация горения. Период, за который она достигается, представляет собой время локализации.

Кривые, характеризующие зависимость времени тушения от интенсивности подачи пены, имели области критической и оптимальной интенсивности. Оптимальная интенсивность устанавливалась по положению минимального значения удельного расхода пены. Удельный расход определялся произведением времени тушения пламени на интенсивность подачи пены [4].

Кривые, характеризующие огнетушащую эффективность растворов исследованных ПАВ, постепенно сдвигались в область меньших значений интенсивностей подачи пены, что свидетельствует о повышении огнетушащей эффективности гомологов с большей молекулярной массой. На рис. 4 представлена зависимость времени тушения пламени гептана от интенсивности подачи пены низкой кратности, полученной из 2 %-ных водных растворов различных алкилсульфатов. На рисунке хорошо заметны области критической интенсивности.

Причина термического распада пены, стабилизированной обычными углеводородными ПАВ, заключается в утрате их молекулами поверхностной активности при достижении температуры в пенных пленках раствора 70...95 °С [3]. При этих темпера-





**Рис. 4.** Зависимость времени тушения пламени гептана от интенсивности подачи пены низкой кратности, полученной из 2 %-ных водных растворов различных алкилсульфатов: 1 — этилгексилсульфат натрия; 2 — смесь алкилсульфатов с числом углеродных атомов 8–10; 3 — децилсульфат натрия; 4 — лаурилсульфат натрия; 5 — смесь алкилсульфатов с числом углеродных атомов 12–14; 6 — то же, с числом углеродных атомов 12–18

турах молекулы ПАВ десорбируются с границы раздела *раствор – воздух*, а пленка пены теряет устойчивость и слой пузырьков разрушается.

Пена из растворов гомологов алкилсульфатов отличается низкой устойчивостью к обезвоживанию, поэтому в процессе продвижения пены по горячей поверхности часть раствора вытекает из пены и кратность пены постепенно возрастает. В отличие от уравнения материального баланса пены, поданной на тушение пламени гептана, приведенного в работе [4], в данном случае, кроме накопления, оба члена уравнения материального баланса учитывают потери раствора как в результате контактного разрушения, так и за счет самопроизвольного истечения раствора. Зависимость кратности пены  $K$  от степени заполнения пеной горячей поверхности  $\theta$  дается полуэмпирической формулой

$$K = K_0 + \alpha S_0 \theta, \quad (3)$$

где  $K_0, K$  — исходное и текущее значения кратности пены;

$\alpha$  — удельная толщина пенного слоя, зависящая от средней толщины слоя и концентрации полимера;

$\theta = S_f / S_0$ ;

$S_f$  — площадь, покрытая пеной;

$S_0$  — площадь поверхности горящего гептана.

С учетом введенных поправок материальный баланс пены может быть представлен уравнением

$$q d\tau = \theta S_0 U d\tau + \rho_0 h \frac{S_0 d\theta}{K_0 + \alpha S_0 \theta}, \quad (4)$$

где  $q$  — секундный расход пены;

$\tau$  — время тушения;

$U$  — удельная средняя скорость разрушения пены;

$\rho_0$  — плотность пенообразующего раствора;

$h$  — средняя толщина пенного слоя.

Разделив переменные, приводим формулу (4) к виду табличного интеграла:

$$d\tau = \frac{\rho_0 h d\theta}{((-U) S_0 \theta + q)(\alpha S_0 \theta + K_0)}. \quad (5)$$

После интегрирования с учетом граничных условий  $\tau = 0, \theta = 0$  и  $\tau = \tau_T, \theta = 1$  получим выражение

$$\tau_T = \frac{h \rho_0}{q \alpha + U K} \ln \frac{q(S_0 \alpha + K)}{K(q - U S_0)}. \quad (6)$$

Перейдя от секундного расхода  $q$  к интенсивности  $J$ , получим:

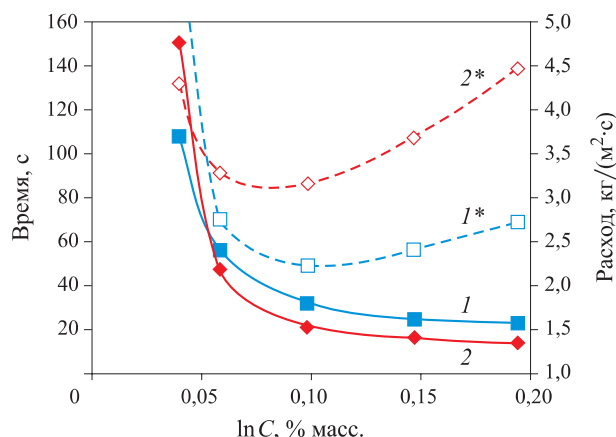
$$\tau_T = \frac{h \rho_0}{\alpha S_0 J + U K} \ln \frac{J(S_0 \alpha + K)}{K(J - U)}. \quad (7)$$

В соответствии с работой [4] толщина пенного слоя зависит от интенсивности подачи пены. Чем выше интенсивность подачи и предельное напряжение сдвига пены, тем больше разница в толщинах пенного слоя в месте подачи и по периметру растекания. Используя аналогичный прием, введем в формулу (5) зависимость средней толщины пенного слоя от интенсивности подачи. В результате получим формулу для оценки времени тушения пламени углеводородов пеной:

$$\tau_T = \frac{\rho_0 (h_0 + \beta J)}{\alpha S_0 J + U K} \ln \frac{J(S_0 \alpha + K)}{K(J - U)}, \quad (8)$$

где  $h_0$  — минимальная толщина пенного слоя;

$\beta$  — параметр, который зависит от природы полимера, фторсодержащих компонентов, молекулярной массы спирта и его доли в смеси топлива.



**Рис. 5.** Сопоставление данных по времени тушения (1, 2) и расходу пены (1\*, 2\*), полученных расчетом по формуле (8) (1, 1\*) и в эксперименте (2, 2\*) с использованием пены на основе алкилсульфатов натрия с длиной углеродной цепи  $C_{12}-C_{14}$

Критическая ситуация в процессе тушения возникает при  $J = U$ , т. е. при нулевом значении подкоренного выражения в знаменателе дроби, стоящей под знаком  $\ln$ , когда  $J \rightarrow U$  и  $\tau \rightarrow \infty$ .

Выражение для критической интенсивности подачи пены получим в том случае, если интенсивность подачи пены равна критической интенсивности и удельной скорости разрушения пены:  $J = U = J_{кр}$ .

Сопоставление результатов, полученных расчетом по формуле (8) и в эксперименте, показано на рис. 5.

Результаты экспериментов, полученных для пен из растворов алкилсульфатов, начиная с децилсульфата натрия, удовлетворительно описываются формулой (8), но для гомологов с меньшей молекулярной массой наблюдаются большие различия, особенно в области интенсивностей, близких к критическим.

Эта формула выведена из предположения, что разрушение пены происходит с постоянной удельной скоростью в течение всего процесса ее растекания по горячей поверхности углеводорода. По-видимому, природа контактного разрушения пены для децилсульфата и этилгексилсульфата натрия определяется иной закономерностью, которая должна учитывать возрастание удельной скорости контактного разрушения во времени.

Исследования показали, что огнетушащая эффективность гомологов в ряду алкилсульфатов натрия коррелирует с поверхностной активностью растворов этих ПАВ на границе с гептаном и воздухом. Чем выше коэффициент растекания раствора по гептану, тем меньше удельный расход пены, необходимый для тушения пламени гептана.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 53280.2–2010. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 2. Пенообразователи для подслоного тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах. Общие технические требования и методы испытаний. — Введ. 01.07.2010 г. — М.: Стандартинформ, 2010.
2. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф., Дегаев Е. Н. Лабораторная методика определения изолирующих свойств пены на поверхности гептана // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 4. — С. 72–76.
3. Шароварников А. Ф., Шароварников С. А. Пенообразователи и пены для тушения пожара. — М.: Пожнаука, 2005. — С. 152.
4. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Основные параметры процесса тушения пламени нефтепродуктов пеной низкой кратности // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 7. — С. 65–73.

*Материал поступил в редакцию 6 ноября 2014 г.*

English

## FIRE EXTINGUISHING EFFICIENCY OF FOAMS BASED ON AQUEOUS SOLUTION OF SODIUM ALKYL SULFATES

**KOROL'CHENKO D. A.**, Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA\_kbs@mgsu.ru)

**DEGAEV E. N.**, Postgraduate Student of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA\_kbs@mgsu.ru)

**SHAROVARNIKOV A. F.**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA\_kbs@mgsu.ru)

### ABSTRACT

Fire extinguishing efficiency of low expansion foam based on aqueous solutions of sodium alkyl sulfates is investigated. Superficial activity of aqueous solutions of foaming agents on the border with heptane are researched and on the basis of these measurements it were calculated spreading coefficients of water solution on a heptane and a heptane on the solution. It is shown that the behavior of

the foam received from solutions of alkyl sulfates in contact with burning heptane is considerably differs. It is established that fire extinguishing efficiency of homologs among sodium alkyl sulfates correlates with superficial activity of solutions of these SAS (surface-active substances) on a border with heptane and air.

**Keywords:** fire extinguishing efficiency; aqueous solutions of sodium alkyl sulfates; coefficient of spreading of water solution on a heptane; superficial activity of SAS solutions.

#### REFERENCES

1. *National Standard of Russian Federation 53280.2–2010. Automatic fire extinguishing systems. Fire extinguishing media. Part 2. Foam concentrates for subsurface extinguishing of fires of oil and petroleum products in tanks. General technical requirements and test methods.* Moscow, Standartinform Publ., 2010 (in Russian).
2. Korol'chenko D. A., Sharovarnikov A. F., Degaev E. N. Laboratornaya metodika opredeleniya izoliruyushchikh svoystv peny na poverkhnosti geptana [Laboratory standard technique for insulating properties of foam on heptane surface]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 72–76.
3. Sharovarnikov A. F., Sharovarnikov S. A. *Penoobrazovateli i peny dlya tusheniya pozharov* [Foam concentrates and fire extinguishing foams]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2005, p. 152.
4. Korol'chenko D. A., Sharovarnikov A. F. Osnovnyye parametry protsessa tusheniya plameni nefteproduktov penyoy nizkoy kratnosti [Main parameters of extinguishing of the oil flame by low expansion foam]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 7, pp. 65–73.



## Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу

### А. Я. Корольченко, Д. О. Загорский КАТЕГОРИРОВАНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ И ЗДАНИЙ ПО ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ И ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ. — М. : Пожнаука, 2010. — 118 с.



В учебном пособии изложены принципы категорирования помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности, содержащиеся в современных нормативных документах. На примерах конкретных помещений рассмотрено использование требований нормативных документов к установлению категорий. Показана возможность изменения категорий помещений путем изменения технологии или внедрения инженерных мероприятий по снижению уровня взрывопожароопасности и повышению надежности технологического оборудования и процессов.

Пособие рассчитано на студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям “Пожарная безопасность”, “Безопасность технологических процессов и производств”, “Безопасность жизнедеятельности в техносфере”, студентов строительных вузов и факультетов, обучающихся по специальности “Промышленное и гражданское строительство”, сотрудников научно-исследовательских, проектных организаций и нормативно-технических служб, ответственных за обеспечение пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: mail@firepress.ru

**ВОПРОС:**

В нормативных документах по молниезащите большое внимание уделяется защите пожаровзрывоопасных и других важных государственных объектов, а информация по защите от молний частных жилых домов дается очень кратко. При этом большое число пожаров от поражения молнией приходится именно на частный жилой сектор и причина тому — халатное отношение людей к такому грозному явлению, как молния.

Каким образом можно защитить индивидуальные жилые дома от поражения молнией с учетом требований нормативной литературы по молниезащите?

**ОТВЕТ:**

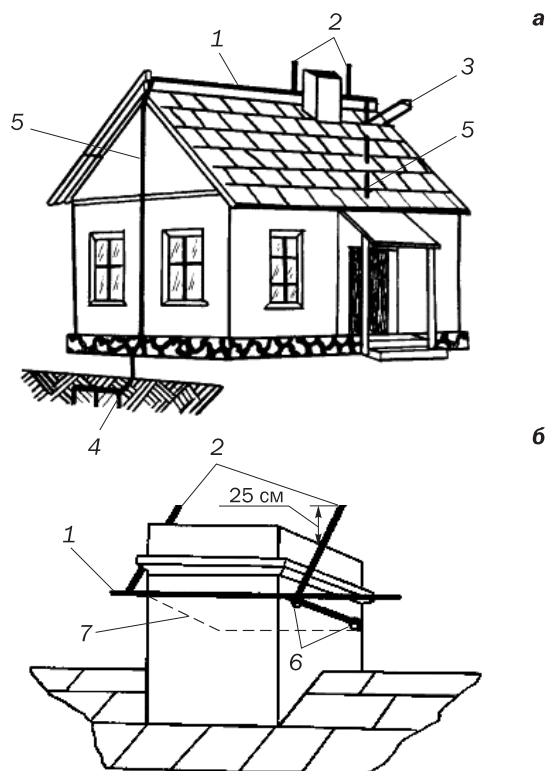
Согласно Инструкции по устройству молниезащиты зданий и сооружений (РД 34.21.122–87 [1]) жилые здания относятся по молниезащите к III категории в местностях со среднегодовой грозовой деятельностью 20 ч и более. Такие здания должны быть защищены от прямых ударов молнии и заноса высокого потенциала через наземные (надземные) металлические коммуникации (см. п. 1.2 [1]).

Жилые дома обычно оборудуют недорогими и простыми в исполнении молниезащитными устройствами. Защита от прямых ударов молнии может быть осуществлена устройством молниеотводов любого вида — либо отдельно стоящих, либо установленных на самом здании. Возможно применение как стержневых, так и тросовых молниеотводов. Стержневые молниеотводы выполняются в виде вертикально установленных стрежней, соединенных токоотводами с заземлителями, а тросовые — в виде горизонтально подвешенных тросов или проводов, закрепленных на изолированных опорах.

В качестве молниеприемников могут использоваться конструктивные элементы здания, например металлические кровли и трубы, парапеты и др., а также отдельные проводники или сетка из стальных проводников, проложенные по крышам защищаемых объектов.

Дома с металлической кровлей, соединенной токоотводами с заземлителем, в установке дополнительных молниеотводов в большинстве случаев не нуждаются. Однако не следует забывать о том, что при малой толщине металла (менее 4 мм) прямой удар молнии в кровлю может вызвать локальный нагрев металла в месте удара, реже — полное расплавление его со сквозным прожигом. При этом возможно возгорание находящихся под кровлей горючих веществ. Более подробная информация по толщине металлических покрытий изложена в рубрике “Вопрос – ответ” в № 8/2014 данного журнала.

Отдельные небольшие дома или группа домов, расположенные вблизи высоких деревьев, могут быть защищены устройством молниеотвода на одном из деревьев. Использование деревьев в качестве опор для отдельно стоящих молниеотводов возможно, если они имеют высоту, в 2–2,5 раза превышающую высоту дома (вместе с антенной), и отстоят от него на расстоянии 3–10 м. От-



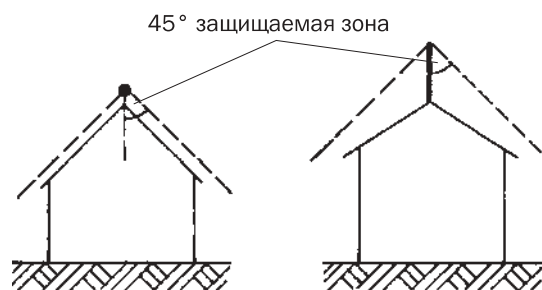
**Рис. 1.** Молниезащита небольших домов стержневыми и тросовым молниеотводами с установкой их на крыше (а) и с креплением молниеприемника к дымовой трубе (б): 1 — молниеприемник тросовый; 2 — молниеприемники вертикальные стержневые (вилка); 3 — изоляционная планка; 4 — заземлители; 5 — токоотвод; 6 — скобы; 7 — проволока вязальная (оцинкованная)

сюда следует, что высота деревьев должна составлять порядка 15–20 м [2].

Молниезащиту небольших жилых домов и строений (площадью застройки не более 150 м<sup>2</sup> и высотой до 7 м) с неметаллической кровлей выполняют упрощенным способом (рис. 1).

Над коньком крыши с помощью деревянных или иных изоляционных планок, укрепленных по торцам крыши, натягивают круглую проволоку диаметром 6–8 мм (молниеприемник), желательна оцинкованную или с коррозионно-стойким покрытием, на расстоянии 100–250 мм от конька. При этом угол между вертикальной линией, опущенной от оси проволоки, и линией, соединяющей ось проволоки с карнизом крыши, не должен превышать 45° (рис. 2).

Для повышения эффективности защиты в местах крепления планок по торцам крыши укрепляют вертикальные молниеприемники длиной 400 мм, присоединяемые к проволоке (см. рис. 1). Концы горизонтального молниеприемника крепятся на планках, опускаются по стенам здания до уровня земли, образуя токоотводы, и присоединяются к заземлителям. Для токоотвода и заземлителя допускается применять проволоку диаметром 5 мм [3]. Если длина здания не более 10 м, токоотвод и заземлитель устраивают только с одного торца здания.



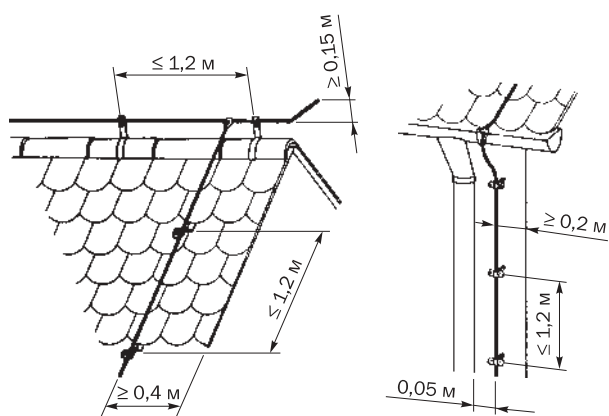
**Рис. 2.** Зона защиты горизонтального тросового молниеприемника, расположенного над коньком крыши

Применяется также горизонтальный тросовый молниеотвод в ином исполнении. Он отличается от вышеуказанного тем, что концы молниеприемника на расстоянии от края 250–300 мм загибаются и служат в качестве вертикальных молниеприемников, которые затем присоединяются к токоотводам (рис. 3).

В тех случаях, когда крыша здания неметаллическая, молниезащиту здания осуществляют с помощью наложения металлической заземленной сетки или стержневого молниеотвода, установленного на самом здании. Стальную проволоку диаметром 6–8 мм закрепляют на крыше в виде ячеек размером не более 12×12 м, прокладывая ее прежде всего по коньку крыши. Молниеприемную сетку не менее чем в двух противоположных местах присоединяют к заземлителям при помощи токоотводов, выполняемых из той же проволоки и прокладываемых по стенам здания.

Если внешний периметр кровли составляет менее 20 м, то допускается применять только один токоотвод. Для кровли с большим периметром число токоотводов определяют по отношению реального периметра здания к минимальному (20 м), округляя полученный результат в большую сторону. Например, если периметр кровли составляет 70 м, то, разделив данное значение на 20 м, получим 3,5. Это значит, что присоединение молниеприемника к заземлителю необходимо выполнять с помощью четырех токоотводов.

Следует также учесть, что токоотводы и заземлители необходимо размещать в малодоступных для людей местах с целью исключить возможность поражения их молнией. Токоотводы желательно располагать на расстоянии не менее 2 м от оконных и дверных проемов, а также от металлических конструкций (например, наружный блок кондиционера, ограждения, трубопровод, кабельные линии и т. д.). В случае отсутствия такой возможности выполняется экранирование токоотвода на проблемном участке путем прокладки его через трубу из твердого диэлектрического материала (поливинилхлорида) с толщиной стенки не менее 5 мм [4]. Нижний конец токоотвода закладывается в траншею глубиной 0,6–1,0 м, находящуюся на расстоянии 1 м от здания, и закапывают на длину, обеспечивающую сопротивление растеканию каждого заземлителя не более 20 Ом [3]. При использова-



**Рис. 3.** Схема установки горизонтального тросового молниеприемника на неметаллическую кровлю и крепления токоотводов к кровле и стене защищаемого здания

нии заземлителя в виде горизонтальной полосы длина 5 м считается достаточной. При применении вертикального заземлителя необходимо принимать длину равной 2,5 м.

Помимо кровли, защищают и все выступающие над ней части (дымовые и вентиляционные трубы, фонари и др.). Для этого по коньку фонаря и периметру дымовой трубы прокладывают стальную проволоку и по кратчайшему пути присоединяют ее к молниезащитной сетке.

Таким образом, выбор варианта и монтаж молниезащитных устройств должны проводиться с учетом конструктивных особенностей здания и соблюдения безопасных расстояний между токопроводящими частями молниеотвода и защищаемого здания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.21.122–87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений : утв. Главтехуправлением Минэнерго СССР 12.10.87 г.; введ. 12.10.87 г. — М. : Энергоатомиздат, 1989.
2. Харечко В. Н. Рекомендации по молниезащите индивидуальных жилых домов, коттеджей, дачных (садовых) домов и других частных сооружений. — М. : ЗАО “Энергосервис”, 2002. — 176 с.
3. Черкасов В. Н. Молниезащита сооружений в сельской местности. — М. : Россельхозиздат, 1983. — 62 с.
4. IEC 62305-3:2010. Protection against lightning — Part 3: Physical damage to structures and life hazard (Защита от молнии. Часть 3. Физические повреждения конструкций и опасность для жизни).

Ответ подготовили сотрудники кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи Академии ГПС МЧС России: канд. техн. наук, профессор, академик НАНПБ **В. Н. ЧЕРКАСОВ**; старший преподаватель **А. С. ХАРЛАМЕНКОВ** (e-mail: h\_a\_s@live.ru)

**ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПОЖНАУКА»**

**ПРЕДЛАГАЕТ ВАШЕМУ ВНИМАНИЮ**

Г. И. Смелков, В. Н. Черкасов,  
В. Н. Веревкин, В. А. Пехотиков, А. И. Рябиков

# ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ во взрывопожароопасных зонах

**Справочное пособие**

М.: ООО «Издательство «Пожнаука», 2012. – 222 с.



Приводятся новые, отвечающие современной нормативной базе, требования по классификации горючих смесей и пожаровзрывоопасных зон; рекомендации по выбору и использованию оборудования, включая кабельные изделия во взрывопожароопасных зонах.

Издание предназначено для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и монтажом электроустановок, работников пожарной охраны и специалистов широкого профиля в качестве учебного пособия для подготовки и повышения квалификации в области пожаровзрывобезопасности электроустановок.

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал «ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ» статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; проблемные обзоры и краткие сообщения; комментарии к нормативно-техническим документам; справочные материалы и т. п. Методы расчета и экспериментальные данные, полученные автором, должны быть оформлены в соответствии с рекомендациями КОДАТА. Остальные численные данные, за исключением общеизвестных величин, следует снабжать ссылками на первоисточник. Научные статьи должны иметь практическую направленность. В начале работы (например, во введении) целесообразно кратко изложить состояние проблемы и место в ней данной задачи. В конце публикации должны быть сделаны краткие выводы с указанием научной новизны и практической полезности материала.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

**1.** Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены в редакцию в электронном виде по электронному адресу (info@fire-smi.ru), а также в бумажном виде по почте (121352, Российская Федерация, г. Москва, а/я 43). Статья должна быть ясно изложена, тщательно отредактирована и подписана авторами.

**2.** 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 информативными, в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия; не должен также использоваться непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

**2.3.** Информация об авторах.

**2.3.1.** Имена, отчества и фамилии всех авторов (полностью, на русском языке и в транслитерации). Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

**2.3.2.** Степени, звания, должность, адресные сведения о месте работы всех авторов (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: официальное полное название организации вместе с ведомством, к которому оно принадлежит (при переводе — желательно его официально принятый английский вариант), индекс, страну, город, название улицы, номер дома, а также контактные телефоны и электронный адрес хотя бы одного из авторов. Все почтовые сведения на иностранном языке (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть представлены на английском языке, в том числе название города и страны.

*Пример: Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Prospekt Vernadskogo, 101, Moscow, 119526, Russian Federation).*

**2.4.** Аннотация на русском языке (не менее 4–5 предложений).

**2.5.** Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторские резюме на английском языке в русскоязычном издании являются 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);
- оригинальным (не быть калькой с русскоязычной аннотации с дословным переводом);

- содержательным (должны излагаться существенные результаты работы; не должен включаться материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т. е. следовать логике описания результатов в публикации);
- «англоязычным» (написано качественным английским языком; необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. «*The study tested*», но не «*It was tested in this study*»);
- объем текста авторского резюме должен быть не менее 100–250 слов.

Приветствуется структура резюме, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). Однако предмет, тема, цель работы указываются в том случае, если они неясны из заглавия статьи; метод или методологию проведения работы целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной или представляют интерес с точки зрения данной работы.

Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме.

Текст должен быть связным, излагаемые положения должны логично вытекать один из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом употреблении в авторском резюме.

В авторском резюме не даются ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

**2.6.** Ключевые слова (на русском и английском языках).

**2.7.** Текст статьи (в формате Word через 1,5 инт.; формулы должны быть набраны в Equation 3.0 или MathType).

**2.8.** Пристатейные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Цитируемая литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке цитирования. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. При этом цитируемый один в один текст из других публикаций следует брать в кавычки. 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.

**2.9.** Пристайные списки литературы в романском алфавите (латинице) — References.

Для References можно предложить следующий формат:

Author A. A., Author B. B., Author C. C. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49–53.

### Примеры описаний в References

Статьи из журнала:

Zagurenko A. G., Korotovskikh V. A., Kolesnikov A. A., Timonov A. V., Kardymon D. V. Tekhniko-ekonomicheskaya optimizatsiya dizayna gidrorazryva plasta [Techno-economic optimization of the design of hydraulic fracturing]. *Neftyanoye khozyaystvo — Oil Industry*, 2008, no. 11, pp. 54–57.

(Авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] (представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо), курсивом название журнала (транслитерация — перевод), год выхода издания, номер журнала, интервал страниц. Нежелательно в ссылках делать произвольные сокращения названий источников).

Статьи из электронного журнала:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B. P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 1999, vol. 5, no. 2. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (Accessed 28 April 2011).

Статьи с DOI:

Zhang Z., Zhu D. Experimental research on the localized electrochemical micro-machining. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2008, vol. 44, no. 8, pp. 926–930. doi: 10.1134/S1023193508080077.

(Если описываемая публикация имеет doi, его указание обязательно в References).

Статьи из периодического издания (сборника трудов):

Astakhov M. V., Tagantsev T. V. Eksperimentalnoye issledovaniye prochnosti soyedineniy “stal—kompozit” [Experimental study of the strength of joints “steel—composite”]. *Trudy MGTU “Matematicheskoye modelirovaniye slozhnykh tekhnicheskikh sistem”* [Proc. of the Bauman MSTU “Mathematical Modeling of Complex Technical Systems”], 2006, no. 593, pp. 125–130.

Материалы конференций:

Usmanov T. S., Gusmanov A. A., Mullagalin I. Z., Mukhametshina R. Ju., Chervyakova A. N., Sveshnikov A. V. Osobennosti proyektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniym gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novyye resursosberegayushchiye tekhnologii nedropolzovaniya i povysheniya neftegazootdachi”* [Proc. 6th Int. Symp. “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact”]. Moscow, 2007, pp. 267–272.

Книги (монографии, сборники):

Nenashev M. F. *Posledneye pravitelstvo SSSR* [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

Переводные книги:

Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S. P., Iang D. Kh., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenernom dele*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1985. 472 p.).

Интернет-ресурс:

Pravila Tsitirovaniya Istochnikov [Rules for the Citing of Sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (Accessed 7 February 2011).

Диссертации или авторефераты диссертаций:

Semenov V. I. *Matematicheskoye modelirovaniye plazmy v sisteme kompaktnyy tor*. Dis. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

ГОСТы:

State Standard 8.586.5–2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p. (in Russian).

Описание патента:

Palkin M. V., e. a. *Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya* [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF, no. 2280590, 2006.

На сайте издательства Emerald даны достаточно подробные рекомендации по составлению пристайных списков литературы по стандарту Harvard (Harvard Reference System) практически для всех видов публикаций <http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/harvard.htm?part=2>, а также программные средства для их формирования.

**3.** 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.

**4.** Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений представляются 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 создать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций не приемлемы.

**5.** 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.

**6.** К статьям следует прилагать рецензию, которая должна быть подписана рецензентом из сторонней организации (с указанием его Ф. И. О., ученого звания, ученой степени, должности, места работы), заверена отделом кадров (ученым секретарем) и печатью. Все рецензенты должны являться признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и иметь в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи.

**7.** Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати.

**8.** Плата за публикацию работ с аспирантов не взимается.

**Приглашаем Вас к сотрудничеству на страницах нашего журнала.**



# УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Издательство “Пожнаука” предлагает Вам оформить подписку на журнал “Пожаровзрывобезопасность” на 1-е полугодие 2015 г., а также годовую подписку.

ПЕРСОНАЛЬНАЯ ПОДПИСКА **ПОЖАРОВЗРЫВО-**  
на журнал

**БЕЗОПАСНОСТЬ**



ISSN 0869-7493

КУПОН '2015

Издание	Цена подписки, руб.	Количество экземпляров	Стоимость подписки, руб.
Журнал “Пожаровзрывобезопасность” (1-е полугодие 2015 г.)	<b>5200</b>		
Журнал “Пожаровзрывобезопасность” (годовая подписка)	<b>10400</b>		

- Укажите в таблице количество экземпляров, которое Вам необходимо. В связи с введением обязательного составления счетов-фактур при совершении операций по реализации просим прислать также карточку Вашей организации. Эти сведения необходимы для подготовки и высылки Вам счета-фактуры.
- Заполненный купон и копию платежного поручения вышлите по e-mail: info@fire-smi.ru, mail@firepress.ru в отдел распространения.
- Оплату за подписку Вы можете произвести по следующим реквизитам:  
ООО “Издательство “ПОЖНАУКА”  
Почтовый адрес: 121352, г. Москва, а/я 43  
ИНН / КПП 7731652572 / 773101001  
Р/с 40702810930130056301 в ОАО “Промсвязьбанк” г. Москва  
К/с 30101810400000000555  
БИК 044525555  
Главный редактор — *Корольченко Александр Яковлевич*

**По вопросам подписки просьба обращаться по телефонам  
(495) 228-09-03, 8-909-940-01-85**

**ПОДПИСКА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ:**

через ООО “Издательство “Пожнаука”;  
через агентство “РОСПЕЧАТЬ”, индекс 83340;  
через агентство “АПР”, индекс 83647  
(в любом почтовом отделении в каталоге  
“Газеты и журналы”);

через подписные агентства:  
ООО “Интер-Почта 2003”, ООО “ИНТЕР-ПОЧТА-РЕГИОН”,  
ООО “Урал-Пресс XXI”, ООО “Информнаука”,  
ЗАО “МК-ПЕРИОДИКА”



# ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Московский государственный  
строительный университет

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21AM09 от 24.06.2014 г.



Научно-исследовательские и сертификационные испытания:

- ♦ строительных материалов;
- ♦ строительных конструкций;
- ♦ огнезащитных составов;
- ♦ кабельных изделий;
- ♦ пенообразователей;
- ♦ фасадных систем.

Контакты:

Тел.: (495) 662-69-70

e-mail: ikbs@mgsu.ru

[www.ikbs-mgsu.ru](http://www.ikbs-mgsu.ru)