

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

Академия Государственной противопожарной службы

**Некоторые особенности
пожаровзрывобезопасности при работе с водородом**

Монография

*Под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,
доктора технических наук, профессора С. В. Пузача*

Одобрено редакционно-издательским советом
Академии ГПС МЧС России

Москва
2017

УДК 614.841.1
ББК 38.96+22.311
Н 47

Р е ц е н з е н т ы:

В.М. Есин, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве
Академии ГПС МЧС России, д.т.н., профессор
В.И. Зыков, профессор кафедры специальной электротехники,
автоматизированных систем и связи
Академии ГПС МЧС России д.т.н., профессор

Н 47 Некоторые особенности пожаровзрывобезопасности при работе
с водородом. Монография / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко; под ред.
С. В. Пузача. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2017. – 70 с.

ISBN 978-5-9229-0152-9

Представлены результаты численных экспериментов по выявлению особенностей естественной конвекции в неоднородной водородно-воздушной смеси, образующейся при натекании водорода в помещение. Проведен анализ пожаровзрывоопасности разгерметизации гидридного аккумулятора водорода, в котором водород находится в химически связанном состоянии. Для ряда широко распространенных модельных задач натекания водорода в помещение получены аналитические решения для расчета коэффициентов участия водорода в горении и взрыве.

Монография ориентирована на научных и инженерных работников, специализирующихся в области пожарной безопасности водородных энергоустановок, а также для научных и практических работников пожарной охраны, преподавателей и слушателей высших образовательных учреждений пожарно-технического профиля. Рекомендуется к использованию для выполнения научно-исследовательских и нормативно-технических работ по оптимизации пожарной безопасности в области водородной энергетики.

Издано в авторской редакции.

ББК 38.96+22.311
УДК 614.841.1

ISBN 978-5-9229-0152-9

© Академия Государственной противопожарной
службы МЧС России, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Естественная конвекция в неоднородной водородно-воздушной смеси.....	6
2. Особенности пожаровзрывоопасности разгерметизации гидридного аккумулятора водорода при пожаре.....	31
2.1. Постановка задачи.....	31
2.2. Математическая модель расчета тепломассообмена внутри гидридного аккумулятора водорода.....	37
2.3. Особенности тепломассообмена при разгерметизации гидридного аккумулятора при пожаре	43
3. Аналитические решения модельных задач расчета коэффициентов участия водорода в горении и взрыве.....	50
3.1. Стационарная одномерная концентрационная диффузия водорода в водородно-воздушной смеси.....	50
3.2. Ламинарная и турбулентная конвекция на горизонтальной пластине при натекании водорода	54
3.3. Конвективная колонка, образующаяся над источником натекания водорода в помещении.....	58
Заключение	65
Литература	67

ВВЕДЕНИЕ

Обзор крупных технических и природных аварий и катастроф XX столетия показывает, что перспективная разработка и реализация программ научно-технического развития цивилизации и эксплуатация сложных технических систем трудно осуществима без комплексного подхода к решению проблем безопасности. В ряду опасных технических комплексов особое место занимают водородные системы, поскольку водород обладает высокой степенью взрывопожароопасности. Из исследованных 150 крупных аварий, происшедших в промышленности СССР за 1970-1989 гг., 27 связаны со взрывами водорода, причем в основном в замкнутых объемах помещений. Если сравнить ежегодный мировой объем производства водорода (более 500 млрд. м³), то по сравнению со взрывами в закрытых объемах число его взрывов в открытой атмосфере невелико.

Наибольшую взрывоопасность водород имеет при объемном отношении водорода и кислорода 2:1, или водорода и воздуха приближенно 2:5.

Считается, что взрывоопасные концентрации водорода с кислородом возникают от 4 % до 96 % объемных, при смеси с воздухом – от 4 % до 75 % по объему.

Гремучий газ (смесь водорода с кислородом или воздухом) самовоспламеняется при атмосферном давлении при температуре 510°С. При комнатной температуре в отсутствие источников зажигания (искра, открытое пламя) гремучий газ может храниться неограниченно долго, однако он способен взорваться от самого слабого источника, так как для инициирования взрыва достаточно искры с энергией 17 мкДж.

Водород горит бледным, слабоокрашенным пламенем. Пламя водорода довольно горячее: горелка, работающая на смеси водород-кислород, может дать пламя с температурой более 2500°С, при горении водорода на воздухе достигается температура около 2000°С.

Водород имеет широкий спектр применения:

- химическая промышленность (при производстве аммиака, метанола, мыла и пластмасс, в качестве газа-носителя в газовой хроматографии);
- пищевая промышленность (при производстве маргарина из жидких растительных масел, зарегистрирован в качестве пищевой добавки E949);
- авиационная промышленность (когда-то дирижабли и воздушные шары наполняли водородом);
- метеорология (для заполнения шаропилотных оболочек);
- ракетное топливо;
- электроэнергетика (в турбогенераторах обмотка ротора имеет непосредственное охлаждение водородом).

Можно выделить ряд аварий связанные с применением водорода в промышленности:

- авария на нефтеперерабатывающем заводе «Киришнефтеоргсинтез» в городе Кириши Ленинградской области, произошедшая 29 мая 2008 года; в водородной компрессорной технологической установке по вторичной переработке нефти произошел взрыв водородсодержащей смеси, а затем пожар; сверхнормативный износ штока поршневого компрессора повлек разрушение сальникового уплотнения, что привело к разгерметизации компрессора и выбросу большого количества водородсодержащего газа; в результате выброса в помещении образовалась взрывоопасная смесь газа с кислородом воздуха, и произошел взрыв;

- взрыв на Ангарском нефтехимическом комбинате 20 апреля 2009 г. с последующим факельным горением водорода, в результате которого обрушилась кровля на площади 120 м²; причиной явилось утечка водорода;

- авария на АЭС Фокусима-1 – крупная радиационная авария максимального 7-го уровня по Международной шкале ядерных событий, произошедшая 11 марта 2011 г. в результате сильнейшего в истории Японии землетрясения и последовавшего за ним цунами; землетрясение и удар цунами вывели из строя внешние средства электроснабжения и резервные дизельные генераторы, что явилось причиной неработоспособности всех систем нормального и аварийного охлаждения и привело к расплавлению активной зоны реакторов на энергоблоках 1, 2 и 3 и взрыву, причиной которого явилось образование водорода в результате пароциркониевой реакции при высокой температуре и паросодержании.



Рис. 1. Последствия пожара масла и водорода с обрушением кровли в машинном зале электростанции

На рис. 1 показана фотография последствий горения масла и водорода в машинном зале электростанции.

В предлагаемой монографии представлены результаты численных экспериментов по выявлению особенностей естественной конвекции в неоднородной водородно-воздушной смеси, образующейся при натекании водорода в помещение. Проведен анализ пожаровзрывоопасности разгерметизации гидридного аккумулятора водорода, в котором водород находится в химически связанном состоянии. Для ряда широко распространенных модельных задач натекания водорода в помещение получены аналитические решения для расчета коэффициентов участия водорода в горении и взрыве.

1. ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ В НЕОДНОРОДНОЙ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Современный энергетический кризис и ограниченные запасы природных энергетических ресурсов (нефть, газ, уголь) привели к развитию нетрадиционной энергетики, использующей возобновляемые источники энергии: солнце, ветер, приливы-отливы, подземные геотермальные воды и т.д. По мере истощения ископаемых ресурсов этот вид энергетики будет постепенно вытеснять, а в перспективе полностью заменит традиционные способы получения энергии.

Создание энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии требует также решения экологических задач. Поэтому большое внимание уделяется экологически чистым энергоносителям, одним из которых является водород. Кроме того, запасы сырья для его получения (вода) практически не ограничены. Однако водород более взрывоопасен, чем другие газы, так как он образует взрывоопасные смеси с воздухом в значительно более широком диапазоне концентраций. Поэтому важной задачей при создании водородных энергоустановок является снижение их пожаровзрывоопасности.

Закономерности образования взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в верхнюю часть помещения большого объема изучены достаточно широко [1]. Характерное время выравнивания концентраций водорода по всему объему помещения при этом составляет порядка нескольких часов [1]. При натекании водорода в нижнюю часть помещения это время составляет порядка нескольких минут, что описывается в работе [1] без приведения каких-либо экспериментальных данных. Это связано со сложностью точного измерения быстроизменяющихся концентраций этого газа [2]. Поэтому актуальной задачей является изучение закономерностей образования локальных взрыво- и пожароопасных концентраций при натекании газа в нижнюю часть.

При проведении численных расчетов принимаются следующие исходные данные:

размеры (объем) помещения: $B \times L \times H = 3 \times 3 \times 3$ м ($V = 27$ м³); $6 \times 6 \times 6$ ($V = 218$ м³);

один открытый проем с величиной проемности $\Pi = 0,346$; верхний срез проема находится на уровне потолка; вертикальная ось симметрии проема располагается симметрично относительно стены помещения, где находится проем; отношение высоты проема к его ширине $\bar{z} = 0,57$;

газовая среда в помещении считается идеальным газом с постоянными теплофизическими свойствами и оптически прозрачной;

системы механической вентиляции, пожаротушения и отопления отключены.

Натекание водорода в помещение имитируется заданием источника массы водорода в центре пола с постоянным по времени массовым расходом $G_h = 0,004$ кг/с на высоте 0,3 м (или 0,6 м) от уровня пола в пределах одного контрольного объема (основной вариант). Исходные данные взяты из работы [3] для случая утечек водорода из гидридного аккумулятора под тепловым воздействием пожара. При проведении численного эксперимента диапазон изменения массового удельного расхода находится в диапазоне $j_h = 0,01 \div 0,1$ кг/(с·м²) при эффективном диаметре отверстия, через которое поступает водород, изменяющемся в пределах $d_{\text{эф}} = 0,2 \div 0,7$ м.

Исходные данные соответствуют ламинарному и переходному режимам изотермического течения водорода в выходном сечении отверстия. Эти режимы практически не влияют на динамику процесса, так как основной движущей силой являются подъемные силы, существенно превышающие начальный импульс струи водорода.

Начальные условия принимаются следующие:

температуры газовой среды помещения, ограждающих конструкций и наружного воздуха равны 293 К;

давления в газовой среде помещения и наружном воздухе на уровне пола равны 10^5 Па;

массовые концентрации: кислорода – $X_{\text{O}_2} = 0,23$, азота – $X_{\text{N}_2} = 0,77$, остальных газов – равны нулю.

Граничные условия:

параметры состояния атмосферы: температура – 293 К, давление – 10^5 Па, скорость ветра – 0 м/с;

коэффициенты теплоотдачи на наружных поверхностях ограждающих конструкций рассчитываются по критериальным уравнениям для свободной конвекции [4] и формулам для лучистого теплового потока [4].

На рис. 1.1 приведены линии одинаковой массовой концентрации водорода, на рис. 1.2 и 1.3 показаны схемы течения и линии одинаковых

скоростей в вертикальной плоскости, проходящей через центр пола и перпендикулярной стене с открытым проемом, через 10, 50 и 120 сот начала натекания. Зависимости массовых концентраций водорода в нескольких характерных точках помещения от времени с начала натекания водорода представлены на рис. 1.4.

Из рис. 1.1–1.4 ясно, что физическая картина течения внутри помещения в различные моменты времени существенно различна.

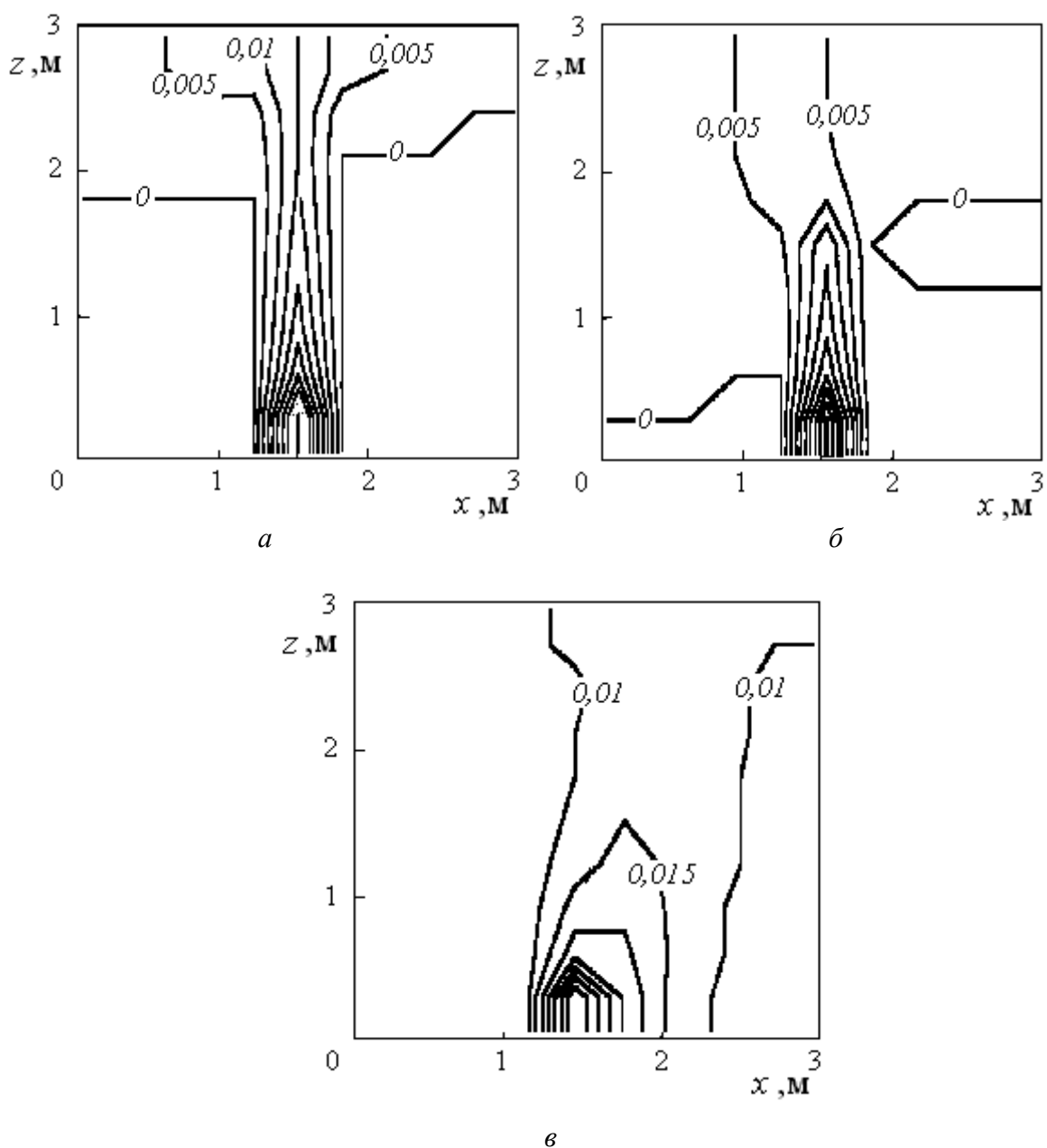


Рис. 1.1. Поле концентраций водорода в различные моменты времени:
a – 10 с; *б* – 50 с; *в* – 120 с

Научное издание

ПУЗАЧ Сергей Викторович
ЛЕБЕДЧЕНКО Ольга Сергеевна

Некоторые особенности
пожаровзрывобезопасности при работе с водородом

Монография

Компьютерный набор *С. В. Пузача*
Компьютерная верстка *С.В. Пузача*

Подписано в печать 26.06.2017. Формат 60×90 1/16.
Бумага офсетная. Печ.л. 4,5. Уч.-изд. л. 3,1.
Тираж 500 экз. Заказ 349

Академия ГПС МЧС России
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4