

Гельфанд Б.Е.
Попов О.Е.
Чайванов Б.Б.

Водород: параметры горения и взрыва



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 536.46

ББК 24.5

Г 32

Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. **Водород: параметры горения и взрыва.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 288 с. — ISBN 978-5-9221-0898-0.

Обобщены результаты преимущественно экспериментальных исследований процессов горения, воспламенения/самовоспламенения, быстрой дефлаграции и детонации в водородсодержащих горючих системах. Для анализа выбраны исследования при начальных условиях, представляющих практический интерес для проблем водородной энергетики и решения вопросов безопасности при преднамеренном использовании или случайном появлении водорода в технических устройствах. Описаны возможные режимы взрывного превращения, их концентрационные, барические, температурные и геометрические условия реализации и возможные ограничения. Оценены вероятные варианты использования водорода в качестве горючего. Рассмотрены вопросы, связанные с горением предварительно не перемешанных и частично перемешанных смесей, содержащих водород, а также последствия взрывов для горючих облаков водородсодержащих систем в атмосфере и для газонаполненных погруженных в жидкость полостей.

ISBN 978-5-9221-0898-0

© ФИЗМАТЛИТ, 2008

© Б. Е. Гельфанд, О. Е. Попов,
Б. Б. Чайванов, 2008

*Посвящается памяти академика Я. Б. Зельдовича —
основоположника теории горения и взрыва*

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Введение	9
Принятые сокращения и обозначения	13
Глава 1. Основные параметры, определяющие горение водородсодержащих смесей	17
1.1. Фундаментальные характеристики горения предварительно перемешанных газовых смесей	17
1.2. Ламинарное и ячеестое пламя	23
1.3. Турбулентное пламя	61
1.4. Турбулентное горение и его подавление в системах водород+воздух+водяной туман/распыленная вода	76
1.5. Концентрационные пределы распространения пламени	84
1.6. Критические энергетические характеристики источников воспламенения	98
1.7. Геометрические пределы распространения пламени	103
Литература к главе 1	106
Глава 2. Быстрая дефлаграция и неидеальные квазидетонационные процессы	119
2.1. Быстрая дефлаграция/квазидетонация в загроможденном пространстве	119
2.2. Квазидетонация в пористой структурированной среде	123
2.3. Взрывные процессы в системе жидкость+пузырьки с горючей смесью	127
2.4. Масштабные факторы в быстрых взрывных процессах	129
2.5. Феноменология взрывных процессов	132
Литература к главе 2	137
Глава 3. Самовоспламенение водородсодержащих смесей	140
3.1. Предварительные замечания	140
3.2. Самовоспламенение заранее перемешанных смесей водорода с воздухом и кислородом при реальных начальных условиях	142
3.3. Особые случаи самовоспламенения	152
3.4. Влияние окислов азота на самовоспламенение водородсодержащих смесей	153
3.5. Самовоспламенение водорода в присутствии добавок углеводородных горючих	155
3.6. Термогазодинамические явления при воспламенении и горении гомотенных смесей вблизи неплоских поверхностей	158
3.7. Самовоспламенение водорода в присутствии ингибирующих добавок	172
Литература к главе 3	178

Глава 4. Детонационные режимы горения	185
4.1. Параметры детонационных волн	185
4.2. Условия распространения детонации в смесях, содержащих водород	196
4.3. Критическая энергия прямого инициирования сферической детонации	203
4.4. Детонация водородсодержащих смесей с двухкомпонентными газобразными горючими веществами	206
Литература к главе 4	210
Глава 5. Спонтанное возникновение взрывных процессов	214
5.1. Переход горения в детонацию	214
5.2. Критические градиенты температуры и концентрации для перехода горения в детонацию	219
Литература к главе 5	224
Глава 6. Фугасные нагрузки при взрывах водородсодержащих смесей	228
6.1. Параметры взрывных волн при детонации облаков горючих водородсодержащих смесей	230
6.2. Параметры волн разрежения	239
6.3. Диаграммы поражения волнами разрежения	243
6.4. Параметры отраженных взрывных волн при газовом взрыве	246
6.5. Влияние геометрии газового объема на параметры взрывных волн	248
6.6. Параметры взрывных нагрузок при подводном взрыве газонаполненных полостей	251
6.7. Особенности фугасной нагрузки внутри детонирующего облака горючей смеси	256
6.8. Сводная диаграмма поражения при взрыве объемов горючей газовой смеси	258
Литература к главе 6	260
Глава 7. Особенности горения и взрыва в предварительно не перемешанных и частично перемешанных смесях	265
7.1. Общее представление о диффузионном пламени	266
7.2. Тройные и краевые пламена	269
7.3. Распространение диффузионного пламени в присутствии крупных вихрей	270
7.4. Отрыв и срыв струйного пламени. Механизм стабилизации	272
7.5. Экспериментальные данные по характеристикам диффузионного факела пламени водорода	273
Литература к главе 7	277
ПРИЛОЖЕНИЕ	280
Вместо послесловия	285

Предисловие

Одним из перспективных путей получения тепловой энергии является использование водорода, производимого из воды с применением экологически чистых первичных энергоисточников. Это направление получило название водородная энергетика. Водородная энергетика сформировалась как одно из направлений развития научно-технического прогресса в середине 70-х годов прошлого столетия. Среди первичных источников энергии, необходимых для получения водорода из его соединений, в том числе из воды, наиболее технически подготовленными считаются ядерные реакторы. Такое сочетание водорода и ядерной энергии в 1970-е годы определило новое направление энергетике — атомно-водородная энергетика. В нашей стране уже выполнены и получили необходимое научно-техническое обоснование и экспериментальное подтверждение проекты высокотемпературных гелиевых реакторов (ВТГР) атомных энерготехнологических станций (АЭС) для химической промышленности и черной металлургии. Среди них можно отметить проект атомной энерготехнологической станции с реактором ВГ-400 мощностью 1060 МВт для ядерно-химического комплекса по производству водорода и смесей на его основе, в том числе по выпуску аммиака и метанола. Основой для проектов ВТГР послужили разработки ядерных ракетных двигателей на водороде. Созданные в нашей стране для этих целей испытательные высокотемпературные реакторы и демонстрационные ядерные ракетные двигатели проиллюстрировали работоспособность при нагреве водорода до рекордной температуры 3000 К.

Водород — высокоэффективное и экологически чистое горючее с энергией на единицу массы 120,7 МДж/кг, что выше, чем у любого органического топлива. Водород — хороший энергоноситель для использования в двигателях внутреннего и внешнего сгорания, автономных генераторах электричества и тепла. Водород удобно применять для транспортировки и аккумуляции энергии. Транспорт водорода существенно дешевле транспорта электроэнергии. Водород, производимый из воды с помощью специальных (в том числе на основе ядерных ресурсов) технологий, может оказаться возобновляемым горючим.

Наиболее представительный опыт использования водорода накоплен в ракетостроении. Здесь водород применяется как эффективное горючее в смеси с кислородом для жидкостных реактивных двигателей РКК «Энергия». Известны интересные перспективы использования в качестве горючего разнообразных рецептур на основе сочетания водорода с углеводородами. Другой перспективной областью внедре-

ния водорода является реализация топливных элементов, в которых электричество получается в процессе «холодного» горения энергоносителя. Широкое использование подобной технологии получения электроэнергии ожидается в автотранспорте, а также перспективно в коммунально-бытовом секторе. Плодотворной представляется работа по твердополимерным топливным элементам, предназначенным для транспорта нового поколения (автомобили и автобусы), и высокотемпературным твердоокисным обратимым топливным элементам с рабочей температурой более 800 °С.

Мировое производство водорода в настоящее время превысило 50 млн тонн в год и быстро растет. Ожидаемая промышленная потребность к 2050 году оценивается примерно в 400 млн тонн. Пока современное крупнотоннажное производство водорода осуществляется в процессе паровой конверсии природного газа (метана). В этом случае около половины исходного сырья расходуется на проведение соответствующего эндотермического процесса. С целью экономии природного газа и снижения нагрузки на окружающую среду разработана технологическая схема паровой конверсии метана с подводом тепла от высокотемпературного гелиевого реактора. В ближайшем будущем, по-видимому, методы получения водорода из природного газа останутся основными.

В долгосрочной перспективе интерес представляют способы получения водорода из воды с использованием тепловой и электрической энергии ядерных реакторов. Это так называемые замкнутые термохимические и термоэлектрохимические циклы, высокотемпературный электролиз, а также различные комбинированные способы получения водорода из воды. Сочетание высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов с высокотемпературными электролизерами позволит иметь суммарный КПД производства водорода до 50 %. Высокотемпературные реакторы с гелиевым теплоносителем — это новый тип экологически чистых универсальных атомных энергоисточников, уникальные свойства которых (способность вырабатывать тепло при температуре свыше 1000 °С и высокий уровень безопасности) определяют возможности их широкого использования для производства в газотурбинном цикле электроэнергии с высоким КПД и для снабжения высокотемпературным теплом и электричеством процессов производства водорода, опреснения воды, технологических процессов химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и других отраслей промышленности.

Многостороннее использование водорода в энергетике, промышленности, на транспорте, в коммунальном хозяйстве требует разработки надежных, хорошо обоснованных принципов обеспечения безопасности при обращении с этим рабочим телом ввиду повышенной горючести и взрывоопасности водорода и его смесей. Обеспечение безопасности сводится к предотвращению аварийных ситуаций, которые связаны с потерей герметичности систем, производящих и использующих водород, а также к изучению процессов, протекающих

при авариях, и разработке методов снижения возможных вредных последствий. В области ядерной энергетики активные исследования ведутся в связи с опасностью возникновения пароциркониевой реакции с масштабным выбросом водорода при тяжелых авариях на АЭС с ЛВР. Исследования подобных явлений, а также разработка мер по их устранению или подавлению служат необходимой базой для обеспечения безопасности будущего водородной энергетики.

Книга «Водород: параметры горения и взрыва» написана авторами — сотрудниками Института химической физики им. Н. Н. Семенова РАН и Российского Научного Центра «Курчатовский институт» и представляет собой актуальное для проблем взрывобезопасности водородной энергетики и давно ожидаемое обобщение экспериментально-теоретических результатов исследований по проблемам горения и взрыва водородсодержащих смесей. В книге систематизированы современные сведения, характеризующие процессы самовоспламенения и горения при высоких давлениях, режимы быстрой дефлаграции и детонации смесей, содержащих водород. Даются оценки возможных последствий взрывов горючих облаков в атмосфере и взрывов газонаполненных полостей, погруженных в жидкость.

Выполнен критический анализ имеющихся экспериментальных данных, представляющих практический интерес для водородной безопасности ядерных реакторов, в том числе о горении смесей, содержащих водяной пар при повышенном давлении и температуре. Рассматривается влияние водяного пара и мелкодисперсных капель воды на развивающиеся режимы горения и пределы распространения пламени.

Книга содержит ценную информацию для специалистов, занимающихся использованием водорода как энергоносителя, и для экспертов по промышленной безопасности технологий и аппаратов, в которых водород получается, хранится и транспортируется в качестве рабочего материала.

Н. Н. Пономарев-Степной
академик Российской академии наук,
вице-президент РНЦ «Курчатовский Институт»

Введение

Перспектива применения водорода как экологически чистого энергоносителя, его образование и освобождение в ходе промышленных аварий, возродили интерес к задачам, связанным со сжиганием водородо-кислородных (ВКС) и водородо-воздушных смесей (ВВС). Дополнительным стимулом для такого рода исследований послужили проекты летательных аппаратов с ПРД и ГПВРД на водороде. Проектирование гиперзвуковых летательных аппаратов требует анализа обеспечения парковки и обслуживания систем с большим количеством водорода. Перспектива использования такого топлива и для наземного транспорта ставит задачи поиска более дешевых способов получения водорода, его сохранения и транспортировки.

Развитие водородной энергетики всегда будет сопровождаться достаточно строгими требованиями к герметичности и взрывобезопасности технологического оборудования и энергопреобразующих устройств. Эти требования обусловлены высокой реакционной способностью водорода в сочетании не только с воздухом, но и с другими окислительными газами, например кислородом, хлором, окисью азота и т. д.

Возможность образования смесей водорода с любым из перечисленных газов внутри технологического оборудования, а также возможность выброса водорода из контейнеров для хранения или через запорно-регулирующую арматуру в окислительную атмосферу требуют тщательного анализа состояния мер безопасности различного оборудования с водородом в качестве энергоносителя или рабочего тела, а также оборудования, где водород может образоваться или образуются в технологическом цикле и при аварийной ситуации.

Хотя исследования процессов горения, взрыва и детонации водородсодержащих смесей газов (ВСС) ведутся длительное время, многие вопросы не решены до сих пор. Анализ исследований горения и детонации ВСС показывает, что большая часть из них реализована на примере водородо-кислородных смесей (ВКС) при нормальном или более низком давлении. По известным причинам, обусловленным отсутствием надежных критериев масштабного моделирования, многие результаты таких работ достаточно трудно, а иногда и невозможно использовать для анализа большого числа реальных потенциально опасных ситуаций, возникающих при обращении с водородсодержащими смесями. Даже для ВКС не всегда правилен простой перенос данных из одной области параметров (например, по давлению, размерам оборудования) на другую. Еще больше затрудняется достоверный прогноз параметров и режимов взрывного превращения при введении в газовую

смесь различных добавок. Во многих случаях в ВСС присутствуют в непренебрежимо малых дозах пары воды, окислы углерода и азота. При этом количество вводимой присадки по массе сопоставимо или превосходит массу водорода в смеси. В технике моторостроения достаточно широко представлены ВСС с большим содержанием углеводородных соединений. Нет ничего удивительного в том, что в последние годы появился ряд дополняющих или перекрывающих друг друга обзоров по описанию взрывных характеристик ВСС.

Многообразие реально возникающих ситуаций требует обобщения разрозненных сведений о горении, взрыве, детонации ВСС. Совершенно ясно, что исследователям, занимающимся водородной энергетикой и разрабатывающим правила безопасной эксплуатации соответствующего технологического оборудования, непросто ориентироваться в многоплановых публикациях, где так или иначе описывается взрывное превращение ВСС. Наибольший интерес для практических приложений, по-видимому, представляют следующие соотношения и закономерности.

Зависимость скоростей нормального распространения пламени и детонации от начальных параметров ВСС (температуры, давления, состава). На основе этих сведений можно оценить вероятные скорости взрывного нагружения при взрыве ВСС и предусмотреть требования к предохранительным устройствам и разрядным приспособлениям.

Зависимость параметров взрыва и детонации (давление, температура, состав продуктов взрыва) от начальной температуры, исходного давления и состава ВСС. На основе этих сведений можно оценить предельные ожидаемые нагрузки на оборудование и фугасные эффекты после утечки водорода и формирования облака ВСС.

Пределы распространения пламени и детонации по составу ВСС и их зависимость от давления, температуры, и объема смеси. Здесь наиболее существенно влияние различных газовых добавок на величину предельных концентраций, предельных уровней подвода энергии. Указанные сведения полезны для понимания и поиска путей вывода системы из взрывоопасного состояния.

Критические условия возникновения горения и детонации по составу смеси для ограниченных, полуограниченных и неограниченных объемов. Под полуограниченными понимаются объемы газа со сжимаемой или устраняемой в процессе взрывного превращения ограничивающей поверхностью, допускающей проникновение в зону реакции волн разрежения. Знание практических условий реализации взрывных процессов позволяет обоснованно выбирать геометрические размеры оборудования, соединительных элементов, проектировать разрядные устройства.

Возможные режимы распространения взрывного процесса в условиях загроможденного пространства и их основные свойства — скорость процесса, структура зоны реакции, профиль давления

и импульс в генерируемой пламенем волне. Высокая реакционная способность ВСС обуславливает реализацию широкого спектра скоростей взрывного превращения и при обычных методах подавления взрыва для ВСС последствия в ряде случаев могут оказаться непредсказуемыми.

Зависимость параметров взрывных волн, образующихся после взрывного превращения конечных объемов смеси. Знание параметров взрывных волн при совершившемся взрыве позволяет оценить вероятные разрушения окружающего место взрыва оборудования.

Для оценки последствий наиболее важны давление, импульс, длительность фазы сжатия и их зависимость от расстояния. В некоторых специальных условиях существенными оказываются также и аналогичные параметры волны разрежения. Представленная схема рассмотрения характеристик взрывоопасности ВСС на самом деле является достаточно упрощенной. Последовательность развития событий при образовании и выбросе водорода в любую окислительную атмосферу отличается реализацией цепочки параллельных и последовательных явлений, по-разному влияющих на опасность развивающейся аварии.

Первичными для понимания предпосылок аварии служат вопросы об источниках генерации водорода в той или иной системе и вопросы о путях смешения водорода с окислительной средой. Здесь (в связи с высокой подвижностью и легкостью молекул водорода) можно различать смешение при выбросе в замкнутый объем и при выбросе в неограниченную среду. После того как ВСС появилась в системе, возникает задача о реализации воспламенения от постороннего источника (случайного или специально введенного). Именно в этой части принципиален вопрос о влиянии разнообразных разбавителей (инертизирующих или промотирующих горение). Важное место занимает задача об условиях самовоспламенения ВСС в отсутствие специальных средств или источников поджигания и о связи процессов спонтанного воспламенения с возникновением взрывных режимов распространения реакций. После возникновения горения экспертиза должна дать ответ относительно режима процесса горения, т.е. указать на ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения, определить условия ускорения взрывного процесса и, по возможности, устранить их. Здесь существен анализ конкретной технологической обстановки, в которой развивается авария, т.е. необходимо принять во внимание загроможденность объекта препятствиями в виде размещенного оборудования, перегородок, трубопроводов и т.п., наличие и мощность искусственной и естественной вентиляции, реальность пылеобразования во взрывчатой атмосфере и множество аналогичных конкретных вопросов.

Именно изобилие деталей каждого индивидуального случая зачастую затрудняет получение определенного ответа. В указанных случаях экспертиза вынуждена прибегать к анализу крайних разрушительных режимов взрывного превращения. К числу таких режимов, безусловно, относится детонация ВСС. Менее известны, но не менее опасны по своим разрушительным последствиям могут оказаться

так называемые спонтанные режимы взрывного превращения и сверхзвуковые (но не детонационные) режимы горения.

На основе фундаментальных исследований детонации и дефлаграции желательно предложить некоторые методы подавления взрыва или, в крайнем случае, методы снижения скорости взрывного превращения (что облегчает использование стандартных методов защиты конструкций от взрывных нагрузок). В указанной цепочке экспертных оценок важное место занимают вопросы о поражающих факторах взрыва. Отдельно должны рассматриваться проблемы внутреннего и внешнего взрыва. Особо стоит вопрос о вторичном внешнем взрыве после выброса частично прореагировавшего водорода в среду с избытком окислителя.

Важным для практических применений является и горение предварительно не перемешанных и частично перемешанных ВСС. В последнее время наука обогатилась методами исследования, позволившими лучше понять и по-новому взглянуть на проблемы стабилизации и срыва струйных диффузионных пламен водорода и ВСС.

Читателям предлагается точка зрения авторов на перечисленные проблемы, отражающая преимущественно результаты экспериментальных исследований в области физики горения и взрыва. Книга содержит семь глав. Каждая глава сопровождается собственным списком цитированной литературы.

Авторы с благодарностью отмечают участие в исследованиях Г. Л. Агафонова, А. М. Бартенева, В. П. Карпова, А. Ю. Кушарина, С. П. Медведева, А. Н. Поленова и С. В. Хомика.

Принятые сокращения и обозначения

- АЭС — атомная электрическая станция;
ВВ — взрывчатое вещество;
ВК — взрывная камера;
ВР — волна разрежения;
ВВС — водородо-воздушные смеси;
ВКС — водородо-кислородные смеси;
ВСС — водородсодержащие смеси;
ВОУ — смеси водорода с окисью углерода;
ВУ — смеси водорода с углеводородами;
ВКП и НКП — верхний и нижний концентрационные пределы;
ГПВРД — гибридный прямоточный воздушно-реактивный двигатель;
ПГД — переход горения в детонацию;
ПРД — прямоточный реактивный двигатель;
СТД — стандартные условия по температуре и давлению;
ТВС — топливо-воздушные смеси;
УВ — ударная волна;
УП — ускорение пламени;
 a, b — поперечный и продольный размер ячейки детонации;
 VR — коэффициент перекрытия сечения;
 $C(t)$ — изменение концентрации со временем;
 C — стехиометрическое отношение;
С-Ж — состояние Чепмена-Жуге;
 c_0 — скорость звука в свежей смеси;
 c_1 — скорость звука в продуктах взрыва;
 D — скорость детонации;
 D_i — коэффициент диффузии i -компонента смеси;
Da — число Дамкелера;
 d — диаметр трубы;
 d^* — критический диаметр распространения детонации в трубе;
 d^{**} — критический диаметр перепуска детонации из узкого канала в широкий;
 d_f — критический диаметр свободного цилиндрического заряда для распространения детонации;
 d_r — диаметр зажигающего элемента;
 $d_{кр}$ — критический диаметр трубки при гашении пламени;

- d_{II} — критический размер зазора при гашении пламени;
 E — энергия источника зажигания, инициирования;
 E_{\min} — минимальная энергия зажигания, инициирования;
 E^* — критическая энергия инициирования сферической детонации;
 Fr — число Фруда;
 h — высота подъема диффузионного пламени над срезом горелки;
 I_+, I_- — импульс фазы сжатия (+) и разрежения (–) в воздушной волне;
 J — масса горючего в смеси;
 K — стретч-фактор Карловица;
 K_{ext} — стретч-фактор при гашении пламени;
 K_a — число Карловица;
 K_p — тротильный эквивалент газового взрыва по давлению;
 K_I — тротильный эквивалент газового взрыва по импульсу;
 K_f — декремент затухания давления за фронтом волны;
 k — коэффициент пропорциональности;
 L — длина трубы;
 L_f — длина факела диффузионного пламени;
 L_M — длина (масштаб) Маркштейна;
 L_d — длина преддетонационного участка;
 L_m — минимальное расстояние развития детонации;
 Le — число Льюиса;
 ℓ — масштаб турбулентности;
 $M_1 > 1$ — число Маха детонационной волны; $M_1 = D/c_0$;
 $M_2 < 1$ — число Маха дефлаграционной волны;
 Ma — число Маркштейна;
 n_u — число молей несгоревшей смеси;
 n_b — число молей продуктов реакции;
 n_{H_2} — число молей водорода;
 n — число оборотов вентилятора;
 P_0 — начальное давление смеси;
 P_1 — максимальное давление в проходящей детонационной волне;
 P_2, P_{C-J} — давление в точке Чепмена–Жуге;
 P_3 — максимальное давление при отражении детонационной волны;
 P_c — давление продуктов взрыва;
 P_v, P_{AICC} — давление взрыва при сгорании в постоянном объеме;
 p_v — давление насыщенного водяного пара;
 P_ϕ — максимальное давление в волне сжатия;
 ΔP — перепад давления;
 $\Delta P_\phi, \Delta P_+$ — максимальный перепад давления в волне сжатия;

- ΔP_- — амплитуда волны разрежения;
 Pe — число Пекле;
 Q — теплота сгорания;
 q — объемная плотность энергии газовой смеси;
 R — универсальная газовая постоянная;
 Re — число Рейнольдса;
 R_0 — радиус сосуда, радиус облака ТВС;
 R_f, r_f — радиус фронта пламени;
 S_u — нормальная скорость пламени;
 S_b — видимая скорость пламени;
 S_u^{st} — нормальная скорость в стехиометрической смеси;
 S_u^{max} — нормальная скорость в смеси с максимальной скоростью горения;
 S_u^0 — нормальная скорость плоского пламени;
 S_L — ламинарная скорость горения;
 S_T — турбулентная скорость горения;
 T_0 — начальная температура смеси;
 T_1 — температура продуктов сгорания;
 T_2 — температура в точке Чепмена–Жуге;
 T_{cv} — температура самовоспламенения;
 T_3 — температура зажигания;
 T_b — температура пламени;
 T_{ad} — температура адиабатического пламени;
 t — время;
 t^* — время выдержки в нагретом сосуде перед зажиганием при определении предела;
 Δt_m — время достижения максимального давления взрыва;
 U_B — видимая скорость пламени;
 U_H — нормальная скорость пламени;
 U_{sp} — спонтанная скорость распространения фронта горения;
 U_t — турбулентная скорость горения;
 u'_Σ — пульсационная скорость;
 u'_x, u'_y, u'_z — компоненты пульсационной скорости по трем координатным осям;
 V — объем сосуда;
 W — ширина прямоугольной щели, канала;
 X_{H_2} — объемное содержание водорода в ВСС;
 Y — концентрация активной добавки;
 Z — объемное содержание инертного разбавителя в смеси;
 Ze — число Зельдовича;
 α — температурный показатель скорости горения;
 β — барический показатель скорости горения;
 α_B — коэффициент избытка воздуха в ВСС;

- ϕ — коэффициент избытка горючего;
 φ — объемная доля капель;
 φ_0 — угол между траекторией поперечных волн и образующей детонационной трубы;
 μ — доля сгоревшего вещества, молекулярный вес веществ, вязкость жидкости;
 $\pi = P_1/P_0$ — степень повышения давления при горении и в ударной волне;
 ρ_0 — плотность свежей смеси;
 $\rho_{пв}$ — плотность продуктов взрыва;
 v, β — коэффициенты, объемная концентрация пузырьков горючего газа;
 γ_0 — отношение теплоемкостей в свежей смеси;
 γ_1 — отношение теплоемкостей в продуктах сгорания;
 δ — размер частиц материала забойки;
 δ_0 — толщина пламени;
 δ_L — толщина ламинарного пламени;
 δ_T — толщина турбулентного пламени;
 Λ — приведенное расстояние;
 λ — приведенное расстояние;
 $\sigma = \rho_u/\rho_b$ — степень расширения при сгорании;
 τ_i — задержка самовоспламенения;
 τ_+, τ_- — длительность фазы сжатия (+) и разрежения (–) в воздушной ударной волне;
 Θ — весовая концентрация воды.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ГОРЕНИЕ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ

1.1. Фундаментальные характеристики горения предварительно перемешанных газовых смесей

1.1.1. Ламинарная скорость горения. Ламинарная скорость горения — одна из фундаментальных характеристик реакционной способности перемешанных горючих газов. Она определяет количество смеси, реагирующей в единицу времени на единице поверхности фронта пламени. В соответствии с классическим определением ламинарная скорость горения — это скорость по отношению к несгоревшему газу, с которой плоский одномерный фронт пламени перемещается вдоль нормали к своей поверхности [1.1].

В случае распространяющихся сферических пламен это определение справедливо только асимптотически. Чтобы описать реальные искривленные пламена используют дополнительные параметры, такие как стретч-фактор Карловица [1.2] и длину (масштаб) Маркштейна [1.3, 1.4].

1.1.2. Скорость деформации пламени (стретч-эффект). Большинство реальных пламен подвержены локальной гидродинамической деформации поверхности, в том числе и с изменением локальной кривизны. Этот эффект, который влияет на скорость распространения поверхности пламени, называют «растяжением» (stretch) или стретч-эффектом.

Стретч-фактор Карловица, или, для краткости, стретч K , определяют как скорость изменения элемента поверхности пламени dA/dt , отнесенную ко всей поверхности [1.5]:

$$K = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt}.$$

Величина K имеет размерность с^{-1} . Для сферического пламени она может быть просто выражена через радиус пламени r_f :

$$K = \frac{2}{r_f} \frac{dr_f}{dt}.$$

Здесь dr_f/dt является скоростью пламени по отношению к сгоревшим газам, которую называют видимой скоростью S_b . Верхний индекс 0 вводится, когда речь идет о скорости плоского пламени S_b^0 (с нулевым стретчем) по отношению к сгоревшим газам. Безразмерный стретч, называемый числом Карловица, определяется соотношением

$$Ka = K \cdot \frac{\delta_0}{S_u^0},$$

где δ_0 — толщина ламинарного пламени, S_u^0 — нормальная скорость плоского пламени (свободного от стретча).

Если пламя инициируют в центральной части объема с горючей перемешанной смесью топлива и воздуха, оно продолжает распространяться в виде сферического очага, охватывая все больший объем несгоревшей смеси. Стретч имеет наибольшие значения при малых радиусах пламени r_f и постепенно уменьшается, когда сферический очаг расширяется. Для расходящегося сферического пламени в соответствии с кривизной стретч имеет положительный знак, а для сходящегося пламени — отрицательный. Например, отрицательный знак стретча наблюдается в окрестности вершины пламени, стабилизированного на бунзеновской горелке. В общем случае искривленного пламени знак стретча определяется локально.

1.1.3. Длина (масштаб) Маркштейна. Количественное описание стретча является ключевым вопросом для ламинарного и турбулентного горения. Экспериментальные данные о влиянии стретча на предварительно перемешанное пламя подтверждаются теорией и детальным компьютерным моделированием [1.6–1.13]. Установлено, что, когда величина стретча мала, его влияние на скорость пламени линейно. Изменение скорости горения можно выразить с помощью так называемой длины Маркштейна [1.3, 1.4, 1.10, 1.11], которую вводят на основе соотношения:

$$S_u = S_u^0 - L_M K.$$

Длина (масштаб) Маркштейна — количественная мера отклика пламени на стретч. Здесь S_u — скорость горения искривленного пламени, S_u^0 — скорость горения плоского пламени, L_M — длина (масштаб) Маркштейна, K — стретч.

1.1.4. Число Льюиса и избирательная диффузия. Обычно стретч имеет минимальное влияние на характеристики адиабатического диффузионно-нейтрального недеформированного пламени, но это влияние может существенно измениться в присутствии избирательной

диффузии [1.6, 1.7]. Заметим, что в пламени существуют по крайней мере три различающихся вида диффузии, а именно: диффузия тепла (температуропроводность) (a), диффузия недостающего реактанта (D_i) и диффузия избыточного реактанта (D_j). Из этих трех коэффициентов диффузии можно получить два критерия для избирательной диффузии — сравнивая D_i с a и D_i с D_j , для смесей, отличных от стехиометрических и околостехиометрических смесей. Эти два критерия определяют то, что можно назвать эффектом неединичного числа Льюиса ($Le = a/D_i$) и эффектом дифференциальной диффузии (D_i/D_j). Поведение пламени, в особенности величина температуры пламени, зависит от относительных скоростей диффузии тепла и массы. Если эти диффузии равны, так что $Le = 1$, тогда полная энтальпия сохраняется, и температура пламени T_b соответствует адиабатической температуре T_{ad} . Однако если $Le < 1$, то температура пламени $T_b > T_{ad}$, и наоборот, если $Le > 1$, то $T_b < T_{ad}$.

Теперь рассмотрим эффект дифференциальной диффузии. Если реактант, находящийся в недостатке, имеет более высокий коэффициент диффузии, то концентрация этого реактанта в реакционной зоне будет становиться более близкой к стехиометрии, что приведет к повышению температуры пламени и более интенсивному горению. Обратный эффект имеет место, если недостающий реактант является менее диффузионноспособным.

1.1.5. Диффузионно-тепловая и гидродинамическая неустойчивости. «Растяжение» пламени (стретч-эффект) влияет на скорость ламинарного пламени посредством избирательной диффузии тепла и массы [1.6–1.11]. Этот эффект может стать причиной неустойчивости поверхности пламени в зависимости от знака длины Маркштейна. Если длина Маркштейна отрицательна, ламинарная скорость горения увеличивается с ростом растяжения. Искривления на поверхности пламени, которые являются вогнутыми (выпуклыми) по отношению к продуктам горения, обладают положительным (отрицательным) стретчем, и эти искривления увеличиваются, делая пламя неустойчивым. И наоборот, если длина Маркштейна положительна, ламинарная скорость горения уменьшается с увеличением стретча и искривления поверхности пламени становятся меньше, что свидетельствует об устойчивости пламени.

Эти эффекты могут включать избирательную диффузию массы по отношению к диффузии тепла, приводя к диффузионно-тепловой (ДТ) неустойчивости [1.1, 1.7, 1.14, 1.15], избирательную диффузию одного реактанта по отношению к другому, приводя к диффузионно-диффузионной (ДД) неустойчивости [1.7] или к обоим видам неустойчивости.

Но и при условии нейтральной и стабильной избирательной диффузии при малости влияния сил плавучести ламинарным пламенам присуща гидродинамическая неустойчивость.

Пионерские работы Ландау и Даррье по гидродинамической неустойчивости ламинарного плоского пламени хорошо известны [1.1]. Согласно теории Ландау–Даррье плоское пламя неустойчиво к малым возмущениям любой длины волны. Фактически существуют механизмы, приводящие к устойчивому распространению, если числа Рейнольдса пламени не слишком велики. Механизм гидродинамической устойчивости включает ускорение более плотных реактантов в направлении менее плотных продуктов реакции. Маркштейн [1.3, 1.4] выполнил анализ этого механизма для плоского пламени, трактуя поверхность пламени как разрыв плотности. Задача об устойчивости сферического пламени рассматривалась Истратовым и Либровичем [1.16]. Это направление исследований в настоящее время интенсивно развивается [1.17–1.23]. Выяснено, что развитие возмущений на поверхности крупномасштабных сферических пламен приводит к автотурбулизации поверхности [1.24–1.26], которую можно описать с помощью фрактальных закономерностей [1.27–1.30].

В экспериментах лабораторного масштаба с водородо-воздушными смесями чаще всего сталкиваются с неустойчивостью, вызванной ДТ- и ДД-явлениями. Фотографии сферического пламени в смесях, содержащих 10% и 50% водорода [1.2, 1.31], свидетельствуют о гладком фронте горения в богатой смеси и ячеистом пламени в бедной смеси. В замкнутых камерах сгорания в результате воздействия на фронт пламени отраженных от стенок волн давления, возмущения поверхности усиливаются [1.32, 1.33]. В быстро горящих смесях фронт приобретает «ежеобразную» структуру при приближении пламени к стенкам.

Увеличение скорости горения, наблюдаемое, когда сферическое пламя становится не гладким, а искривленным, ячеистым и турбулентным, связывают с ростом поверхности пламени. Большое количество экспериментальных и теоретических исследований посвящено анализу распространения искривленных и ячеистых пламен [1.6–1.36]. Особое место в этих исследованиях занимает изучение сферического пламени. В экспериментах радиус сферического искривленного пламени может быть определен как радиус гладкой сферы с объемом, равным объему сгоревшего газа. Степень искривления может быть найдена как отношение полной поверхности искривленного пламени к площади поверхности гладкой сферы. Подобный метод используется и для количественного исследования турбулентного горения квазисферических очагов пламени.

1.1.6. Турбулентная скорость горения. Турбулентная скорость горения S_T — наиболее часто измеряемый параметр для горения перемешанных газовых смесей в турбулентном режиме. Этот параметр отражает сложное комплексное взаимодействие турбулентности и химии горения. Безразмерные корреляционные соотношения, связывающие эту величину с другими определяющими параметрами, предложены на основе асимптотического анализа. В частности, Брэдли с соавтора-

ми [1.37–1.42] собрали свыше 1600 экспериментальных данных, касающихся S_T , нормализованных с учетом ламинарной скорости горения S_L и связывающих величину S_T/S_L с фактором искривления, который включает эффективную среднеквадратичную нормализованную пульсационную скорость u'/S_L в холодной перемешанной смеси, и стретч-фактор Карловица K , умноженный на число Льюиса Le . Диаграммное представление также показывает влияние параметра Re/Le^2 , где Re — турбулентное число Рейнольдса. Эти экспериментальные данные в настоящее время являются источником для проверки математических моделей турбулентного горения, в том числе и ламинарной флеймлет-модели [1.43, 1.44] для описания турбулентного горения.

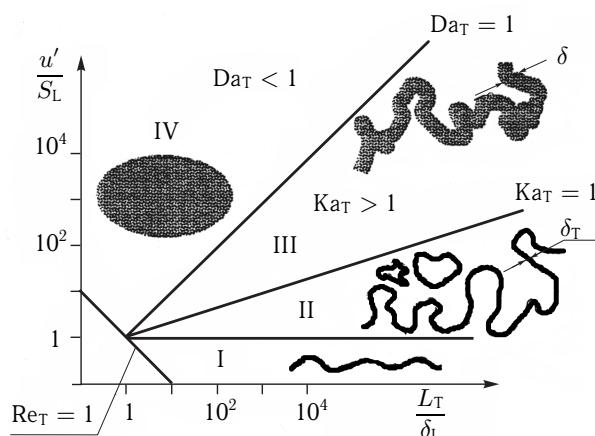


Рис. 1.1. Диаграмма Борги для определения режимов турбулентного горения

Представление о возможных режимах турбулентного горения дает диаграмма Борги [1.45], изображенная на рис. 1.1. По оси абсцисс отложено отношение лагранжева интегрального масштаба турбулентности L_T к толщине ламинарного пламени δ_L , а по оси ординат — отношение пульсационной скорости u' к скорости ламинарного горения S_L (нормальной скорости пламени). Таким образом, левый нижний угол диаграммы представляет ламинарные режимы горения. Границей ламинарных и турбулентных режимов горения является линия, на которой турбулентное число Рейнольдса $Re_T = 1$. Особенности турбулентных пламен зависят от значений турбулентных чисел Карловица Ka_T и Дамкелера Da_T . В области I, где пульсационная скорость не превышает ламинарной скорости пламени, турбулентное пламя имеет искривленный фронт с толщиной, аналогичной толщине ламинарного фронта. С ростом пульсационной скорости степень искривленности увеличивается, и пламя может потерять связную структуру. Однако

и в области II, граница которой соответствует значению турбулентного числа Карловица $Ка_T = 1$, толщина реакционной зоны остается такой же, как и в области I. Это означает, что химическая реакция завершается за время t_c , малое по сравнению с характерным временем турбулентного перемешивания t_T . Отношение t_T/t_c принято называть числом Дамкелера Da_T . В области III, границами которой являются прямые, соответствующие $Ка_T = 1$ снизу и $Da_T = 1$ сверху, ширина зоны реакции увеличивается, и пламя уже не описывается флеймлет-моделью, в основе которой лежит модель ламинарного искривленного пламени. Как предельный случай рассматривают модель «реактора идеального перемешивания», для которого скорость химической реакции мала по сравнению со временем турбулентного перемешивания. Горение в области IV в вихрях при сравнимых значениях масштаба турбулентности и ширины зоны реакции приобретает объемный характер аналогично тепловому взрыву.

1.1.7. Состав смеси. В литературе по горению состав смеси может задаваться несколькими способами.

Обычно используют объемное содержание топлива (в %) и коэффициент избытка горючего, который определяют по формуле

$$\phi = \frac{\text{топл. / окисл.}}{(\text{топл. / окисл.})_{\text{стех.}}},$$

где в качестве окислителя выступает или чистый кислород O_2 или смесь кислорода с азотом $O_2 + 3,76N_2$, которая по составу близка к воздуху.

Если топливом является водород, а окислителем — воздух, можно пользоваться соотношением

$$\phi = \frac{\%H_2 / (100\% - \%H_2)}{0,42}.$$

Здесь числовой множитель 0,42 соответствует стехиометрическому содержанию водорода в воздухе (29,6% по объему). Смеси с $\phi < 1$ называют бедными (по топливу), а с $\phi > 1$ — богатыми.

Коэффициент избытка окислителя, который также применяется в литературе, является величиной, обратной коэффициенту избытка горючего.

Иногда используют величину, называемую стехиометрическим отношением:

$$C = \frac{n_{H_2}}{(n_{H_2})_{\text{стех.}}},$$

где n_{H_2} — число молей водорода в смеси, а $(n_{H_2})_{\text{стех.}}$ — число молей водорода при стехиометрическом соотношении между водородом и кислородом.

Для многокомпонентных смесей, содержащих несколько видов топлива и различных добавок, указывают процентное содержание каждого компонента. Конденсированные компоненты часто задают в массовых долях.

1.2. Ламинарное и ячеестое пламя

1.2.1. Методы измерения ламинарной скорости горения. Скорость горения перемешанных газовых смесей может быть измерена как для стабилизированного, так и для распространяющегося пламени (см. рис. 1.2). Стабилизация пламени достигается на горелках разного типа, в том числе и на горелках со встречными потоками.

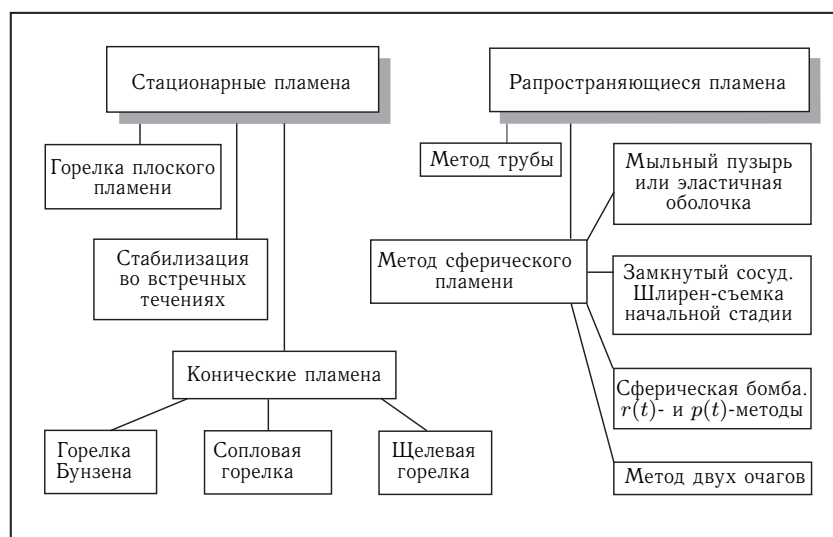


Рис. 1.2. Методы измерения ламинарной скорости горения

Для распространяющегося пламени наиболее совершенным считается шлирен-фотографирование развивающегося сферического очага с одновременной записью давления в бомбе постоянного объема. Три конфигурации пламени, используемые наиболее часто, показаны на рис. 1.3. Этим геометрическим конфигурациям отдается предпочтение, поскольку влияние стретч-эффекта здесь можно контролировать. Критическое рассмотрение способов измерения скорости пламени можно найти в статьях Эндрюса и Брэдли [1.46, 1.47], а также в статьях и книгах других авторов [1.48–1.53].

Количественные исследования горения газовых смесей, начатые еще в XIX веке, в настоящее время продолжают развиваться и совершенствоваться. Теоретические концепции измерения скорости ламинарного

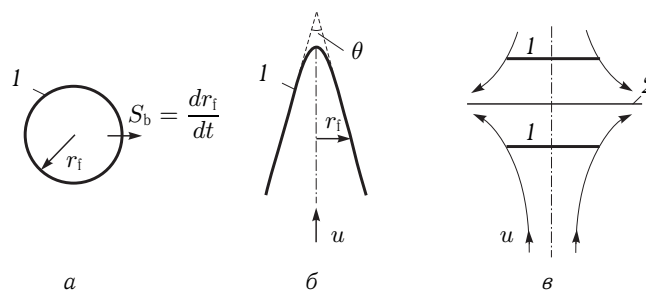


Рис. 1.3. Примеры конфигураций, для которых влияние деформации пламени контролируется: (а) — сферическое нестационарное пламя; (б) — коническое нестационарное пламя; (в) — двойное стационарное пламя во встречных течениях. 1 — фронт пламени; 2 — плоскость симметрии

горения были разработаны Гуи и В. А. Михельсоном в конце XIX столетия [1.1]. Михельсон был первым, кто измерил скорость горения смесей водорода с воздухом при атмосферном давлении и комнатной температуре, определяя площадь поверхности внутреннего конуса бунзеновского пламени [1.54]. Эти уникальные и оставшиеся малоизвестными результаты были получены в широком диапазоне концентрации водорода (от 15,3% до 74,6% по объему). В более поздней [1.55] и цитировавшейся в [1.2, 1.51] работе Яна область бедных водородом смесей вообще не затрагивалась (концентрации водорода были от 30% и выше), а максимальные скорости горения (267 см/с) были ниже измеренных Михельсоном (281 см/с). Л. С. Козаченко [1.56] повторил такие измерения с помощью щелевой горелки и получил результаты, близкие к данным Михельсона.

Ранние (до 1956 г.) экспериментальные данные, касающиеся горения водорода, обсуждались в обзоре [1.57]. В работах [1.58–1.62] рассматривались как теоретические предпосылки, так и детали различных экспериментальных методик по измерению скорости горения.

Одной из особенностей простой бунзеновской горелки является параболический профиль скорости потока для несгоревшего газа. Кроме того, площадь поверхности конуса зависит от того, какую границу пламени (шлирен, теньевую или самосвечение) выбрать [1.53]. Две области с сильно меняющейся кривизной (скругление вершины конуса и искривление возле среза горелки) также являются источником погрешностей [1.2, 1.46].

Использование сопловой горелки преследовало цель получить однородный профиль скорости потока. В [1.58] выяснилось, что скорость остается неоднородной за счет влияния пограничного слоя на срезе горелки, и предложено использовать сопла больших диаметров, чтобы минимизировать этот эффект. Сравнение показало, что скорости горения, измеренные на сопловых горелках, оказывались систематически выше измеренных на простых бунзеновских горелках.

Сопловые горелки в дальнейшем использовались в [1.59–1.61] при измерениях в водородо-воздушных пламенах, а также в [1.62] и [1.63] в пламенах, содержащих водород, воздух и водяной пар.

Таблица 1.1. Ламинарные скорости горения S_u (см/с) в смесях водорода с воздухом при атмосферном давлении и комнатной температуре

Автор	Год	Метод	% H ₂	S_u^{st}	S_u^{max}
Михельсон	1889	Горелка Бунзена	15,3–74,6	217	281
Ян	1934	Горелка Бунзена	30–75	187	267
Бартоломе	1949	Сопловая горелка	40–51,2		320
Козаченко	1954	Щелевая горелка	20–70	233	287
Мэнтон и Милликен	1956	Сферическое пламя	30–70	232	300
Файн	1956	Горелка Бунзена	28–62	193	304
Хаймель	1956	Горелка Бунзена	28–57	206	297
Грумер	1959	Сферическое пламя	48–67,1		
Синьор	1961	Горелка Бунзена	17,4–33	200	
Гюнтер и Яниш	1972	Сопловая горелка	15–70	282	355
Эндрюс и Брэдли	1973	Метод двух очагов	10–70		336
Лю и Макфарлейн	1983	Сопловая горелка	20,6–64		356
Такахаси	1983	Сопловая горелка	29,6–64		308
Ву и Лоо	1984	Сопловая горелка	22,7–70		332
Ву и Лоо	1984	Сопловая горелка	29,6–62,7		308
Ииджима и Такено	1986	Сферическое пламя	17,4–62,7	238	298
Дауди, Смит, Тейлор	1990	Сферическое пламя	9–68	213	286
Еголфопулос и Лоо	1990	Встречное течение	9,7–38,6	209	
Королл, Кумар, Боулз	1993	Метод двух очагов	8–70	250	346
Королл, Кумар, Боулз	1993	Сопловая горелка	30–70	250	330
Вагелопулос и др.	1995	Встречное течение	9,5–18,8		
Фейес и др.	1998	Сферическое пламя	15,9–62,7	210	247
Лоо с соавторами	2000	Сферическое пламя	15,9–62,7	190	282
Ламуре и др.	2003	Сферическое пламя	10–60	209	282
Хуанг и др.	2006	Сферическое пламя	20–38,7	224	

Собранные в табл. 1.1 результаты, опубликованные в работах [1.54–1.74], а также в [1.180–1.181], иллюстрируют имеющиеся расхождения в величинах скорости горения, полученные при использовании различных методик для смесей водорода с воздухом при атмосферном давлении и комнатной температуре.

Существенным ограничением метода горелки является диффузионно-тепловая неустойчивость фронта пламени в бедных водородом смесях (15% H₂ и менее), приводящая к неоднородностям концентрации и температуры в пламени. Вместо обычного гладкого конуса пламя в таких смесях имеет структуру многогранника с чередованием светящихся реакционных зон и зон, где свечение визуально не наблюдается. Другим примером, подтверждающим неоднородность состава, является прорыв вершины конуса. Экспериментальные наблюдения таких особенностей в бедных водородо-воздушных смесях

сделаны в [1.75–1.77]. В [1.78] представлено теоретическое описание явления прорыва вершины конуса.

Большинство ранних измерений основывалось на представлении пламени как бесконечно тонкой поверхности, на которой температура скачком изменяется от начальной температуры T_u до температуры горения T_b , а плотность газа уменьшается от ρ_u — плотности несгоревшего газа — до ρ_b — плотности продуктов горения при температуре T_b . В результате теплового расширения при горении видимая скорость пламени (скорость относительно неподвижного наблюдателя) S_b превышает нормальную скорость горения S_u , которая определяется как скорость по отношению к несгоревшему газу, с которой плоский фронт распространяется в смесь. Из закона сохранения массы следует, что

$$S_u = \frac{\rho_b}{\rho_u} S_b.$$

Величину $\frac{\rho_u}{\rho_b} = \sigma$ называют коэффициентом расширения. Например, при распространении пламени в смеси, заполняющей мыльный пузырь или тонкую эластичную оболочку, коэффициент расширения может быть найден экспериментально по фотографиям. В случае замкнутого объема (сферическая или цилиндрическая камера сгорания) коэффициент расширения находят термодинамическим расчетом температуры горения и равновесного состава продуктов при постоянном давлении. Из уравнения состояния идеального газа следует, что

$$\sigma = \frac{n_b T_b}{n_u T_u}.$$

Этот подход обычно применяется на начальной стадии развития сферического пламени, пока радиус пламени не превышает половины радиуса сосуда. Методу измерений скорости горения в сферическом ламинарном пламени посвящена обширная литература [1.46, 1.48, 1.50, 1.64, 1.67, 1.69, 1.70, 1.74, 1.79–1.86].

Эндрюс и Брэдли [1.46, 1.47], критически рассмотрев имевшиеся методики, показали необходимость учета толщины зоны пламени при использовании метода сферической бомбы. Они также представили результаты измерений скорости горения водородо-воздушных смесей в замкнутом объеме как для одиночного сферического очага пламени, так и для двух очагов пламени,двигающихся навстречу друг другу. На рис. 1.4 для смесей водорода с воздухом показаны величины видимой скорости S_b для одиночного сферического очага пламени по [1.47] и нормальной S_u^0 скорости пламени по [1.70]. Метод двух очагов впоследствии был использован в [1.63] при измерениях скорости горения в бедных смесях водорода с воздухом как для ламинарных, так и для турбулентных пламен.

На рис. 1.5 показаны ламинарные скорости горения водородо-воздушных смесей, полученные разными методиками. Например, видно,

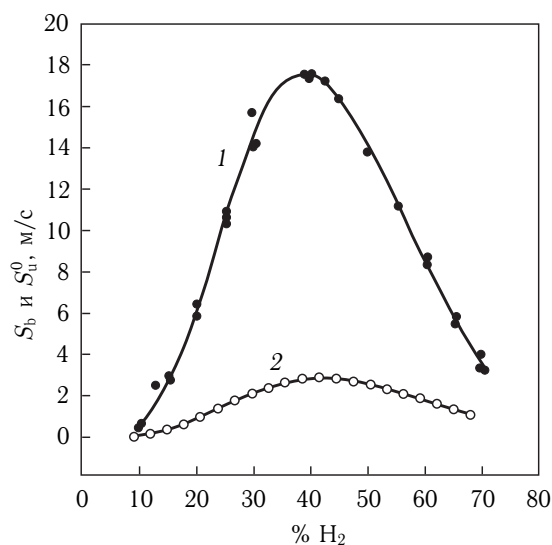


Рис. 1.4. Зависимость видимой скорости пламени (измерения Эндрюс и Брэдли [1.47]) — 1 и нормальной скорости пламени (измерения Дауди и др. [1.70]) — 2 от процентного содержания водорода в смеси с воздухом. Условия по температуре и давлению: 298 К и 0,1 МПа

что результаты измерений Лю и Макфарлейна [1.62] заметно отличаются от результатов, полученных в сферическом пламени и на бунзеновской горелке. Такая особенность может быть объяснена влиянием стретч-эффекта. В [1.62] использовалось слишком малое сопло (3 мм) и в результате получены завышенные значения скорости горения. На рис. 1.6 собраны данные о максимальных скоростях горения водородо-воздушных смесей, измеренных при использовании сопел разного диаметра. Как можно видеть, кажущаяся скорость горения уменьшается с увеличением диаметра сопла. Все экспериментальные данные, полученные с соплами, меньшими чем 7 мм, оказываются заметно выше результатов численного моделирования Диксона-Льюиса [1.79] для плоского пламени и экспериментальных данных [1.70], где была сделана экстраполяция на бесконечно большой радиус пламени на основе феноменологической концепции, развитой в работе Маркштейна.

Данные, полученные методом сферической бомбы для гладкого невозмущенного пламени, вполне согласуются с результатами численного моделирования распространения сферического ламинарного пламени, если использовать современную детальную кинетическую схему окисления водорода и транспортные коэффициенты, описывающие многокомпонентную диффузию вещества и тепла [1.70, 1.73, 1.86]. Более того, в тех нередких случаях, когда это согласование исчезает,

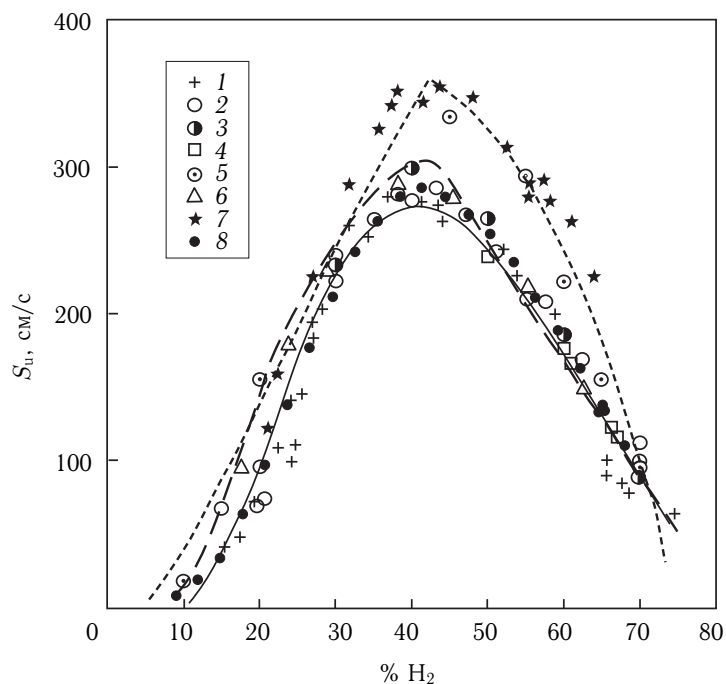


Рис. 1.5. Сравнение нормальных скоростей пламени водородо-воздушных смесей, измеренных разными методиками при комнатной температуре и атмосферном давлении: 1 — Михельсон [1.54]; 2 — Козаченко [1.56]; 3 — Мэнтон и Милликен [1.64]; 4 — Грумер [1.67]; 5 — Эндрюс и Брэдли [1.47]; 6 — Ииджима и Такено [1.69]; 7 — Лю и Макфарлейн [1.62]; 8 — Дауди и др. [1.70]. Короткие штрихи — корреляционная кривая Лю и Макфарлейна. Длинные штрихи — расчеты ИХФ (сферическое пламя). Сплошная кривая — расчеты ИХФ (плоское пламя)

следует проанализировать постановку измерений скорости ламинарного пламени. Примеры, когда расхождение рассчитанных и измеренных скоростей вполне объясняется развитием неустойчивости поверхности пламени, будут приводиться в дальнейшем.

Из всех возможных экспериментальных методик измерения скорости горения для бедных смесей водорода пригодно весьма ограниченное их число. Остановимся на них подробнее, поскольку именно в бедных смесях водорода проявляются эффекты, требующие повышенного внимания к правильной постановке измерений как нормальной скорости ламинарного пламени, так и турбулентной скорости.

Знать величину ламинарной скорости горения S_u^0 важно не только для моделирования процессов ламинарного и турбулентного горения и решения задач химической кинетики, но и при конструировании различных аппаратов для сжигания топлива. Величина S_u^0 является