

**Д.Б. Спoldинг**

# **Основы теории горения**

**Физика**

**Москва**  
**«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
Д11

Д11      **Д.Б. Спoldинг**  
Основы теории горения: Физика / Д.Б. Спoldинг – М.: Книга по Требованию, 2013. – 320 с.

**ISBN 978-5-458-30820-5**

В книге изложены основы теории процессов тепло- и массообмена и теории горения топлива в камерах сгорания газовых турбин. Доп. информация: Книга предназначается для научных и инженерно-технических работников. Книга может также служить пособием для студентов вузов соответствующих специальностей. Из предисловия: Эта книга предназначена для конструкторов занятых разработкой устройств по скжиганию топлива. Хотя рассматриваемые в книге практические вопросы относятся главным образом к газовым турбинам, я надеюсь, что книга окажется полезной также в связи с проблемами сгорания в котельных установках и промышленных топочных устройствах, а также в ракетах, прямоточных двигателях и других камерах сгорания с большой теплонапряженностью. Инженер, приступающий к изучению теории горения, должен предварительно ознакомиться с многочисленными специальными дисциплинами, в том числе с термодинамикой, аэродинамикой, теорией тепло- и массообмена и химией. В общих начальных учебниках эти дисциплины излагаются весьма поверхностно. В более полных курсах аэродинамики и химии, а также в соответствующих справочниках, естественно, содержится столь обширный материал, что специалист-теплотехник не в состоянии его использовать; главная трудность для учащегося заключается в выборе тех немногих разделов соответствующих дисциплин, которые ему действительно необходимы. В результате тесного соприкосновения ряда различных дисциплин статьи, имеющие отношение к проблемам горения, печатаются в самых разнообразных научных и технических журналах написаны с весьма различных точек зрения. Одна и та же экспериментальная установка может быть использована химиком, изучающим природу химических реакций, технологом-нефтяником, ищущим методы стандартного испытания топлив, и инженером-двигателистом, который исследует установку для использования экспериментальных результатов при конструировании двигателя. Поэтому часто лишь по прошествии некоторого времени читатель обнаруживает, что, несмотря на внешнюю общность тем статей, их авторы пишут о разных вещах.

**ISBN 978-5-458-30820-5**

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,

«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Эта книга предназначена для конструкторов, занятых разработкой устройств по сжиганию топлива. Хотя рассматриваемые в книге практические вопросы относятся главным образом к газовым турбинам, я надеюсь, что книга окажется полезной также в связи с проблемами горения в котельных установках и промышленных топочных устройствах, а также в ракетах, прямоточных двигателях и других камерах горения с большой теплонапряженностью.

Инженер, приступающий к изучению теории горения, должен предварительно ознакомиться с многочисленными специальными дисциплинами, в том числе с термодинамикой, аэродинамикой, теорией тепло- и массообмена и химией. В общих начальных учебниках эти дисциплины излагаются весьма поверхностно. В более полных курсах аэrodинамики и химии, а также в соответствующих справочниках, естественно, содержится столь обширный материал, что специалист-теплотехник не в состоянии его использовать; главная трудность для учащегося заключается в выборе тех немногих разделов соответствующих дисциплин, которые ему действительно необходимы. В результате тесного соприкосновения ряда различных дисциплин статьи, имеющие отношение к проблемам горения, печатаются в самых разнообразных научных и технических журналах и написаны с весьма различных точек зрения. Одна и та же экспериментальная установка может быть использована химиком, изучающим природу химических реакций, технологом-нефтяником, ищащим методы стандартного испытания топлив, и инженером-двигателистом, который исследует установку для использования экспериментальных результатов при конструировании двигателя. Поэтому часто лишь по прошествии некоторого времени читатель обнаруживает, что, несмотря на виешнюю общность тем статей, их авторы пишут о разных вещах.

Особые трудности вызывает чрезвычайно быстрый рост объема дисциплин, обусловленный появлением газовой тур-

бины и других устройств, в которых используется процесс горения большой теплоизделияности. В результате быстрого развития научной работы учебники становятся устаревшими почти немедленно после их появления. Их заменяют теперь симпозиумы и коллоквиумы, материалы которых, однако, с трудом усваиваются учащимися.

Эта книга, содержащая попытку последовательного изложения результатов современных исследований сгорания, написана на основе собственного опыта изучения предмета и преодоления тех трудностей, которые возникли передо мной, когда я впервые приступал к работе в этой области. Построение законаченной теории может быть выполнено только путем тщательного анализа результатов эксперимента. Я стремился, хотя может быть и не всегда успешно, осветить лишь те вопросы, которые необходимы для понимания сущности и методов управления процессом горения в инженерных установках, ограничиваясь при этом результатами собственных теоретических и экспериментальных работ. Ввиду того, что теория горения развивается весьма быстро, а методика расчетов еще не установилась, настоящая книга является скорее монографией, чем учебником.

Хотя я предполагаю, что читатель имеет некоторое представление о термодинамике, гидромеханике, тепло- и массообмене, тем не менее в первых трех главах изложены избранные разделы этих дисциплин, причем, разумеется, объем приведенного материала ограничен. Глава 4 посвящена более подробному изложению теории тепло- и массообмена при наличии химической реакции, причем для большей полноты включены некоторые вопросы, которые с точки зрения проблем сгорания в газовых турбинах не имеют особого значения. Моеей целью было дать обобщенный метод расчета скоростей массообмена в наиболее сложных условиях. Однако этот метод еще недостаточно проверен для того, чтобы можно было считать установленной его окончательную пригодность. Экспериментальные данные приведены главным образом в качестве иллюстраций, а не полного обзора имеющихся экспериментальных материалов.

В главе 5 рассматриваются некоторые основные химические особенности горения, а также выясняется, каким образом, взаимодействие химических и физических процессов может объяснить явления, связанные с распространением пламени, устойчивостью процесса горения, погасанием и воспламенением. Здесь не рассматривается глубоко химизм процессов, кроме вопросов о соударениях молекул и поня-

гия энергии активации. Поэтому эта глава может быть неинтересной для химика, но, с одной стороны, использование современных знаний по кинетике химических реакций мало плодотворно, а с другой стороны, большинство явлений, которые интересуют инженера, может быть объяснено простейшими теоретическими соображениями. Я стремился, может быть даже слишком подробно, объяснить взаимосвязь различных характерных явлений, например нормальной скорости распространения пламени, гасящего размера, скорости потока, при которой происходит срыв пламени, и т. д., так как значение отдельного явления легче оценить, располагая общей теорией. Я также стремился подчеркнуть аналогию между факторами, определяющими устойчивость горения гомогенной смеси, жидких и твердых топлив. Устойчивый режим всегда ограничен верхним пределом, при котором скорость массообмена становится чрезмерно большой, и нижним пределом, определяемым тепловыми потерями. Эта однозначность кажется мне имеющей глубокое значение.

Техническое приложение сведений, изложенных в главах 4 и 5, рассматривается в последней главе, краткость которой указывает на ограниченность современного уровня знаний. Очевидно, только после расширения и систематизации этих знаний конструктор камер сгорания получит материал для точного расчета, базирующийся на научных данных. Тем не менее я считаю, что в настоящее время в результате значительных успехов, достигнутых за последние годы, создана прочная основа для разработки методов конструирования камер сгорания; я считаю также, что физические и химические факторы, влияющие на процесс горения, могут быть отделены друг от друга и изучаться порознь, и что все явления, связанные с горением, возникают вследствие взаимодействия этих факторов, которое изменяется в зависимости от аэродинамических условий. Предсказание закономерностей процесса горения, таким образом, зависит лишь от решения, например, задачи о конвективном тепло- и массообмене с соответствующими источниками и стоками, интенсивность которых находится в определенной зависимости от местных температур и составов. Математические методы и техника эксперимента, необходимые для решения этих задач, могут быть заимствованы из соответствующих дисциплин. Однако использование чисто математических методов затрудняется тем, что аэrodинамика турбулентного течения, особенно при больших силах вязкостного трения,

сравнительно мало изучена; эти трудности должны лишь стимулировать попытки их преодоления. Во всяком случае уже сейчас задача может быть поставлена.

Я это утверждаю, несмотря на то, что процесс горения слишком долго казался таинственным и в связи с этим многие не допускают возможности скорой разработки его теории в такой степени, как, например, разработана динамика. Поэтому мое утверждение может показаться слишком смелым. Однако такое неверие в возможность разработки теории в большей мере задерживает прогресс, чем сама сложность проблем, связанных с горением.

18 декабря 1954 г.

*Д. Б. Спalding*

## Глава первая ТЕРМОДИНАМИКА

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Газовая турбина постоянного давления работает следующим образом. Рабочее вещество поступает в компрессор, где его давление увеличивается. Затем вследствие подвода тепла или процесса сгорания увеличивается температура рабочего вещества, и наконец, оно расширяется в турбине до первоначального давления. Вследствие увеличения температуры газ, протекающий через турбину, имеет больший объем, чем газ, сжимаемый в компрессоре. Поэтому работа, необходимая для сжатия, оказывается меньше работы, получаемой при расширении. В результате работа турбины не только достаточна для привода компрессора, но остается еще избыточная энергия, которую можно использовать или непосредственно от вала турбины или в виде кинетической энергии выхлопных газов.

Увеличение температуры воздуха может происходить или вследствие подвода тепла через стенки теплообменника или в результате химической реакции топлива с воздухом; могут осуществляться последовательно и оба эти процессы.

В данной книге будет рассматриваться только внутреннее сгорание. В тех случаях, когда тепло подводится только в теплообменнике, как это происходит, например, в газотурбинных установках с замкнутым контуром, это тепло получается в конечном счете также вследствие сгорания топлива. Процессы, происходящие в теплообменниках, рассматриваются в курсах котельных установок и поэтому в этой книге не затрагиваются.

Нагрев газа является, к сожалению, единственным средством значительного увеличения его удельного объема. При этом возникают существенные трудности транспортирования горячего газа, в особенности если его температура близка к температуре плавления материалов, которые могут быть использованы при конструировании. Это приводит к необхо-

димости значительного ограничения температуры рабочего вещества путем использования для горения лишь части (обычно около одной четверти) кислорода, содержащегося в воздухе. Такое ограничение определяет существенное отличие камер сгорания газовых турбин от обычных топочных устройств, при конструировании которых стремятся по возможности уменьшить количество избыточного воздуха.

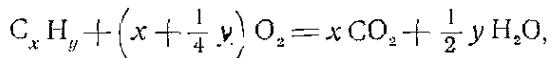
При конструировании газовых турбин и для оценки их эффективности необходима методика расчета количества топлива, которое должно быть сожжено для получения заданного повышения температуры единицы веса воздуха, а также для расчета состава получающихся продуктов сгорания. Необходима также методика обработки данных газового анализа и измерений температуры продуктов сгорания. Методика вычислений, основанная на так называемых стехиометрических соотношениях, одинаковая для всех топочных устройств, кратко изложена ниже.

Изменение объема рабочего вещества при сгорании происходит не только вследствие изменения температуры, но также в результате проходящего при реакции изменения числа молекул. Это необходимо принимать во внимание при вычислении относительных размеров проточных частей компрессора и турбины.

## 2. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС

Связь между количеством продуктов реакции и количеством реагирующих веществ устанавливается на основании следующих положений: 1) все химические соединения состоят из атомов отдельных элементов, связанных в определенных численных соотношениях; 2) атомы при химических реакциях сохраняют свою индивидуальность, т. е. при реакции происходит только перегруппировка атомов.

Например, при полном сгорании углеводорода  $C_x H_y$  соотношение между числом участвующих в реакции молекул описывается уравнением



в котором  $x$  атомам углерода в углеводороде  $C_x H_y$  соответствует  $x$  молекул  $CO_2$ ,  $y$  атомов водорода дают  $\frac{1}{2}y$  молекул  $H_2O$ ; для образования каждой молекулы углекислоты необходима одна молекула кислорода и соответственно

но для каждой молекулы воды — половина молекулы кислорода.

Отметим, что до реакции было  $1 + x + \frac{1}{4}y$  молекул, а после реакции стало  $x + \frac{1}{2}y$  молекул. Поэтому при сгорании одной молекулы газообразного углеводорода происходит изменение числа молекул на  $\frac{1}{4}y - 1$ . Уменьшение или увеличение объема продуктов реакции по сравнению с объемом реагентов при том же давлении и температуре зависит также от агрегатного состояния углеводорода. Если углеводород жидкий, то его объемом обычно пренебрегают; при газообразном состоянии углеводород обычно считают идеальным газом.

### Объемные соотношения

Если все участвующие в реакции вещества — идеальные газы или имеют пренебрежимо малые объемы, то изменение объема (при постоянных температуре и давлении) может быть найдено по изменению числа молекул.

Идеальный газ подчиняется закону

$$PV = NRT,$$

где  $P$  — давление;

$V$  — объем;

$T$  — абсолютная температура;

$N$  — число молей газа, равное частному от деления веса газа на его молекулярный вес;

$R$  — универсальная газовая постоянная.

Этот закон с большой точностью справедлив почти для всех газов, с которыми встречаются при исследовании процесса сгорания в газовых турбинах.

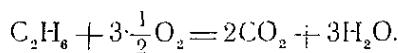
Гипотеза Авогадро, высказанная исторически раньше, чем этот закон, является его следствием. Согласно этой гипотезе:

«В равных объемах различных газов при равных давлениях и температуре содержится равное число молекул».

На основании указанного закона можно найти изменение объема при реакции. В качестве примера рассмотрим сгорание этана при высоких температурах и умеренных давлениях, так как при этих условиях этан и водяной пар, так же как кислород и углекислый газ, можно считать идеаль-

ными газами. Эти условия соответствуют процессу сгорания в газовой турбине.

Уравнение реакции будет



До реакции было  $4\frac{1}{2}$  моля, после реакции стало 5 моля, т. е. объем газа увеличился на  $\frac{1}{2}$  моля/моль топлива при тех же давлении и температуре. При этом также предполагается, что объем газовой смеси равен сумме объемов компонентов, взятых при температуре и давлении смеси.

Это допущение является следствием экспериментально установленного закона Дальтона, согласно которому общее давление смеси, т. е. давление, измеряемое обычными приборами, равно сумме парциальных давлений компонентов, т. е. давлений, которые имели бы компоненты, если бы каждый из них занимал весь объем. Закон Дальтона можно считать справедливым и для реальных смесей газов и паров (например, водяного пара) в условиях рабочих процессов газовых турбин, хотя при высоких плотностях этот закон не подтверждается.

Таким образом, если смешиваются газы  $a, b, \dots, k$ , занимающие при стандартных давлении и температуре объемы соответственно  $V_a, V_b, \dots, V_k$ , то объем смеси  $V$  должен быть таким, чтобы сумма парциальных давлений  $p_a, p_b, \dots, p_k$  была равна общему начальному давлению  $P$ . Тогда  $\frac{V_a}{V} P + \frac{V_b}{V} P + \dots + \frac{V_k}{V} P = P$ , и так как температура не изменяется, то

$$\frac{V_a}{V} P + \frac{V_b}{V} P + \dots + \frac{V_k}{V} P = P,$$

откуда

$$V = V_a + V_b + \dots + V_k.$$

Таким образом, объем смеси идеальных газов равен сумме объемов, которые они занимали до смешения. Следовательно, хотя газовая смесь однородна по составу и каждый компонент распределен во всем объеме смеси, можно пользоваться понятием объемного состава смеси.

При расчетах изменения объема при реакции необходимо различать три случая:

1. Топливо газообразное; температура продуктов сгорания весьма высока или они сильно разбавлены воздухом (последние два условия имеют место при сгорании в газо-

вой турбине). В этом случае все газы можно считать идеальными и отношение их объемов равно отношению числа молей. Для углеводорода  $C_xH_y$  относительное изменение объема равно

$$\frac{\frac{1}{4}y - 1}{x + \frac{1}{4}y} \text{ моль/моль прореагированного кислорода.}$$

2. Топливо гвердое или жидкое; остальные условия аналогичны указанным выше. Объем топлива можно считать пренебрежимо малым, и изменение объема определяется отношением числа молей продуктов сгорания и окислителя. Для углеводорода  $C_xH_y$  относительное изменение объема равно

$$\frac{\frac{1}{4}y}{x + \frac{1}{4}y} \text{ моль/моль прореагированного кислорода.}$$

3. Температуры реагентов и продуктов сгорания низки, водяной пар можно считать полностью сконденсировавшимся и поэтому залимающим пренебрежимо малый объем. Это имеет место при газовом анализе, когда изменение объема вследствие реакции используется для определения состава газа. При этом, несмотря на то, что при комнатной температуре водяной пар нельзя считать полностью сконденсировавшимся, результаты анализа дают правильный состав газа, так как степень насыщения смеси водяным паром остается постоянной. Для газообразного и жидкого (с пренебрежимо малым объемом) углеводорода  $C_xH_y$  относительные изменения объема соответственно равны:

$$\frac{-\left(1 + \frac{1}{4}y\right)}{x + \frac{1}{4}y}, \text{ или } \frac{-\frac{1}{4}y}{x + \frac{1}{4}y} \text{ моль/моль}$$

прореагированного кислорода.

#### Объемный анализ газовых смесей

Обычно для изучения и контроля процесса горения используется аппаратура для газового анализа; типичным можно считать прибор Орса. При анализе в прибор Орса

забирают при атмосферном давлении 100 мл газовой смеси, насыщенной водяным паром. Далее различными реактивами поглощают последовательно отдельные компоненты:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и т. д., причем смесь остается насыщенной водяным паром, и изменяются объемы оставшихся смесей при том же атмосферном давлении. В результате получается так называемый объемный состав сухой газовой смеси, выраженный в процентах.

Следует отметить, что хотя смесь и насыщена водяным паром, тем не менее при анализе получается состав «сухого газа», так как при поглощении реактивами неконденсирующихся газов одновременно происходит и конденсация водяного пара в объеме, занимавшемся поглощенным газом. Состав всей смеси, включая водяной пар, называется составом «влажного газа». Однако этот состав не может быть получен обычным анализом, так как разделение смеси на отдельные компоненты, имеющие одно и то же начальное общее давление, физически невозможно вследствие конденсации воды. В дальнейшем термином «объемный состав» будет обозначаться состав газа, полученный при анализе в приборе типа Орса.

#### Соотношения масс

Каждый атом определенного элемента в любом химическом соединении имеет одну и ту же массу. Поэтому можно по уравнению химической реакции найти массы реагентов и продуктов реакции<sup>1</sup>.

Таблица 1-1

Элемент	Атомный вес	Вещество	Молекулярный вес
O	16,000	$\text{O}_2$	32,000
H	1,008	$\text{H}_2$	2,016
N	14,008	$\text{N}_2$	28,016
C	12,010	$\text{CO}_2$	44,010
S	32,070	CO	28,010
		$\text{H}_2\text{O}$	18,016
		$\text{SO}_2$	64,070

Атомные и молекулярные веса веществ, обычно образующихся при сгорании топлива в газовых турбинах, приведены в табл. 1-1. Десятичными знаками обычно пренебрегают.

<sup>1</sup> Автор всегда использует физическую систему единиц измерения. В дальнейшем всегда г обозначает грамм массы. (Ред.)