

Р.Ш. Загрудинов, П.К. Сеначин, Б.Т. Ермагамбет

**ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ  
ГАЗИФИКАЦИИ  
В ПЛОТНОМ СЛОЕ**

2020

**3 34 Введение в теорию газификации в плотном слое.** / Р.Ш. Загрутдинов, П.К. Сеначин, Б.Т. Ермагамбет. Под ред. Р.Ш. Загрутдинова. – Республика Казахстан, Нур-Султан, 2020. – 244 с.

**ISBN 978-601 – 210-299-4**

В данной книге собраны предварительные сведения о процессах генерации энергетических газов из углеродсодержащего местного сырья и отходов различного происхождения в газогенераторах плотного слоя обращенного процесса.

В настоящее время проблемы энергетики и энергообеспечения в мире приобретают все большее значение. Острыми остаются вопросы энергетической безопасности производственных процессов, гражданских и других объектов. Актуальными являются задачи обеспечения тепловой и электрической энергией и моторным топливом отдаленных районов, пунктов, хозяйственных и гражданских объектов.

Основой энергообеспечения таких объектов могут быть комплексные автономные (стационарные или мобильные) энергетические установки, работающие по схеме – газогенератор, газопоршневая ТЭС (с котлом-утилизатором) и дополнительно установка по производству жидкого синтетического топлива (или других химических продуктов). ТЭС и установка ЖСТ предназначены для работы на местном сырье и отходах органического происхождения.

В данной книге не рассматриваются вопросы воспламенения и горения газообразного и жидкого топлива, а основной темой является горение и газификация твердого топлива, при этом основной упор делается на рассмотрение теории газификации в плотном слое.

Книга предназначена для специалистов и практиков в области теплофизики, теплоэнергетики и химической технологии и особенно может быть полезна студентам старших курсов, магистрантам и аспирантам соответствующих специальностей.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор А.Р. Богомолов.

Все права защищены законом об авторских и смежных правах. Перепечатка текста или любой его части в коммерческих целях без согласования с авторами запрещена.

УДК 622.32 (035.3)  
ББК 33.36

© Р.Ш. Загрутдинов, 2020  
© П.К. Сеначин, 2020  
© Б.Т. Ермагамбет, 2020

**ISBN 978-601 – 210-299-4**

**ЗАГРУТДИНОВ**  
*Равиль Шайхутдинович*  
кандидат технических наук,  
Главный специалист  
ООО Инжинирингового центра  
«Новые энергетические технологии»,  
Россия, Самара

**СЕНАЧИН**  
*Павел Кондратьевич*  
доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН,  
профессор

*Алтайского государственного технического университета  
имени И.И. Ползунова,*  
Россия, Барнаул, Новосибирск

**ЕРМАГАМБЕТ**  
*Болат Толеуханулы*  
доктор химических наук,  
Академик КазНАЕН,  
директор

*ТОО «Институт химии угля и технологий»,  
Республика Казахстан, Нур-Султан*



## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕЦЕНЗЕНТА

Данный труд является не только обобщением результатов работ многих авторов, перечисленных в списке использованных источников, но и включает исследование самих авторов в области газификации твердого топлива.

Авторы в своей книге излагают основы процесса газификации исключительно твердого топлива, отмечая физические явления и химические реакции, происходящие в аппаратном оформлении газогенераторов различного типа, отличающихся, как газифицирующим агентом, так и его направленностью подачи.

Содержание книги направлено на понимание процесса газификации разнообразного твердого топлива и создание условий управления технологическим процессом с получением целевых продуктов: генераторного газа, твердого остатка в виде кокса, а также газа, используемого для получения, как химических продуктов, так и топлива.

Авторы книги предлагают к рассмотрению теоретически обоснованные физико-химические теории газификации твердого топлива. В книге приведены примеры для расчета процессов газификации для конкретных условий, из которых можно найти решения иных условий, определенных заданным процессом газификации.

Книга содержит данные для расчета наиболее совершенных газогенераторов на основе теории разных авторов, а также теоретического обоснования авторов книги.

Непосредственное участие авторов книги в испытаниях смонтированных под их началом газогенераторов, позволило собрать достаточный материал по тепловому режиму газогенераторов, анализу газов, количеству выбросов газификации.

Исследуя работу газогенераторов, авторы сосредоточили внимание на вопросах теории горения и газификации, тепловых эффектов и балансов химических реакций процесса газификации твердого топлива с использованием закона Гесса, а также первого и второго законов термодинамики.

Представленная подробнейшим образом кинетическая теория химических реакций объясняет причины различного хода газогенераторных процессов твердого топлива при изменении давления и температуры, а также их влияние на скорость газификации.

Особое внимание авторы уделили освещению вопросов влияния различных способов подвода и компонентного состава дутья на скорость процесса газификации и количественный состав генерируемого газа.

Кратко, но содержательно в книге отражены вопросы влияния минеральной части твердого топлива на процесс его газификации, а также пути интенсификации подобных процессов переработки твердого топлива. Авторы подробнейшим образом рассмотрели влияние различных металлов и их оксидов, оказывающих каталитическое действие на процессы газификации твердого топлива. Для более углубленного понимания существующего состояния процессов каталитического влияния неорганических добавок на паровую газификацию углеродных материалов в Приложении книги представлена совместная работа по этой теме сотрудников «Института углехимии и химического материаловедения» Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, Кузбасского ГТУ имени Т.Ф. Горбачёва и Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе.

Полезна раскрытая в книге область знаний об особенностях газификации биомассы с термодинамической точки зрения и современного состояния аппаратного оформления газификации биомассы.

Книга написана для инженеров-исследователей и конструкторов энергетического и газогенераторного оборудования, а также может быть полезна в качестве учебного пособия для студентов старших курсов высших учебных заведений по направлениям химическая технология твердого топлива и промышленная теплоэнергетика.

А.Р. Богомолов,

Россия, Кемерово-Новосибирск,

25.02.2019

## СОДЕРЖАНИЕ

№ пп.	Наименование раздела	Стр.
	<b>Сокращения и обозначения</b>	7
1	<b>Общие сведения по химическим реакциям горения</b>	9
1.1	Связь процессов горения и газификации	9
1.2	Характеристика важнейших процессов газификации	11
1.3	Тепловые эффекты химических реакций	20
1.4	Тепловой баланс процесса газификации твердого топлива	22
1.5	Первый и второй законы термодинамики	26
1.6	Закон Гесса	29
1.7	Зависимость теплового эффекта химической реакции от температуры	30
1.8	Аллотермические и автотермические процессы газификации	32
2	<b>Химическое равновесие</b>	33
2.1	Концентрация реагирующих веществ	33
2.2	Закон действующих масс	33
2.3	Уравнение изотермы химической реакции	35
2.4	Принцип смещения равновесий (Принцип Ле-Шателье)	38
2.5	Влияние температуры на химическое равновесие	39
2.6	Влияние давления на химическое равновесие	42
2.7	Химическое равновесие реакций горения и газификации	44
2.8	Теплостойчивость горящих веществ	48
2.9	Диссоциация продуктов горения и её влияние на температуру горения	50
3	<b>Кинетика химических реакций</b>	52
3.1	Общие понятия	52
3.2	Кинетические уравнения химических реакций	54
3.3	Влияние давления на скорость химических реакций	60
3.4	Влияние температуры на скорость химических реакций	61
3.5	Механизм и кинетика цепных реакций	65
4	<b>Физические и физико-химические явления в процессах газификации топлива</b>	70
4.1	Роль адсорбции в реакциях горения и газификации	70
4.2	Диффузионные явления в процессах газификации топлива	73
5	<b>Сжигание и газификация твердого топлива</b>	79
5.1	Основные реакции газификации углерода	79
5.2	Механизм и кинетика горения углерода	80
5.3	Кинетическая и диффузионная области горения углерода	82
5.4	Влияние вторичных реакций на скорость горения углерода	83
5.5	Механизм и кинетика вторичных реакций горения и газификации	86
5.6	Пирогенетическое (термическое) разложение твердых натуральных топлив	93
6	<b>Влияние компонентов дутья на процесс газификации топлива в слое</b>	101
6.1	Газификация углерода при воздушном дутье	101
6.2	Процесс газификации углерода при паровоздушном дутье	106
6.3	Расчет газообразования в слое	109
6.4	Газификация при парокислородном дутье и дутье обогащённом кислородом	110
6.5	Использование в дутье диоксида углерода	116
7	<b>Влияние минеральной части твердого топлива на процесс его газификации</b>	121
7.1	Влияние зольности на процессы газификации	121
7.2	Влияние минеральных компонентов на процессы газификации	122



8	Пути интенсификации процессов газификации твёрдого топлива	124
9	Газификация твёрдого топлива в стационарном слое под высоким давлением	129
9.1	Влияние давления на реакции газификации	129
9.2	Термическое разложение твёрдого топлива	138
9.3	Газификация углеродистого остатка	145
9.4	Получение газа заданного состава	152
9.5	Влияние давления на процесс парокислородной газификации	158
9.6	Влияние компонентов дутьевой смеси на процессы газификации твёрдого топлива в плотном слое	166
10	Особенности газификации биомассы	171
10.1	Общие сведения о биомассе, как топливе для газификации	171
10.2	Химия газификации биомассы	174
10.3	Термодинамика газификации биомассы	175
10.4	Особенности обращённого процесса газификации биомассы	175
10.5	Проблема смолообразования	176
10.6	Аппаратное оформление процесса газификации биомассы	182
11	Каталитическая газификация твёрдого топлива	192
11.1	Общие сведения по каталитической газификации	192
11.2	Исследования процессов каталитической газификации раннего поколения	194
11.3	Исследования процессов каталитической газификации в 1970-80-х годах	199
11.4	Исследования процессов каталитической газификации полукокса и кокса	200
11.5	Анализ современного состояния каталитической газификации в мире	202
	<b>Литература</b>	210
	<b>Приложение:</b>	219
	Влияние неорганических добавок на паровую газификацию углеродных материалов	

**Замечания**

1. За основу данных, приведенных в главах 3-5 книги, в основном, приняты материалы монографии специалистов «Института горючих ископаемых» Академии наук СССР Лаврова Н.В. и Шурыгина А.П. «Введение в теорию горения и газификации топлива. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 213 с.».
2. В главе 9 книги использованы материалы монографии Альшутлера В.С. «Новые процессы газификации твёрдого топлива. — М.: «Недра», 1976. — 280 с.».

*Работа выполнена в рамках научно-технической программы № ИРН BR 05236359 «научно-технической обеспечению переработки углей и производство продуктов углехимии высокого передела» финансируемый Комитетом науки Республики Казахстан.*

**Латинский алфавит**

$A$	— работа;
$A_j$	— молярная концентрация $j$ -го компонента смеси;
$a_j$	— относительная концентрация $j$ -го компонента смеси;
$\text{Вн}$	— число Био;
$C_p, C_v$	— молярные теплоемкости;
$c_p, c_v$	— удельные теплоемкости;
$c$	— объемная теплоемкость;
$D$	— коэффициент диффузии;
$d$	— диаметр канала или частицы;
$E$	— энергия активации химической реакции;
$\text{Fo}$	— число Фурье;
$F$	— свободная внутренняя энергия (энергия Гельмгольца);
$G$	— свободная энтальпия (энергия Гиббса);
$G$	— массовый (или весовой) расход газа;
$g$	— плотность молекулярного (молярного) потока газа;
$H$	— энтальпия (теплосодержание);
$I$	— теплосодержание (энтальпия); импульс (количество движения);
$K_{c(A)}, K_p, K_a$	— константы равновесия;
$k$	— константа скорости химической реакции;
$L$	— количество воздуха; характерный размер; средняя длина пути смешения;
$M$	— молярная масса;
$m$	— масса газа; порядок реакции (в показателе степени);
$\text{Nu}$	— число Нуссельта;
$n$	— количество молей газа; доля; порядок реакции (в показателе степени);
$\text{Pr}$	— число Прандтля;
$P$	— относительное давление;
$p$	— давление;
$Q$	— теплота; тепловой эффект реакции; производительность газогенератора;
$\text{Re}$	— число Рейнольдса;
$R$	— универсальная газовая постоянная;
$S$	— объемная поверхность слоя;
$S$	— энтропия;
$s$	— порядок химической реакции;
$T$	— температура (если не указаны единицы, то по абсолютной шкале);
$t$	— время;
$U$	— внутренняя энергия;
$u, u_j$	— молярная внутренняя энергия, в т.ч. для $j$ -го компонента смеси;
$V$	— объем;
$W_i$	— скорость $i$ -ой реакции;
$w$	— скорость.



## Греческий алфавит

- $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи; относительная доля;
- $\alpha_M$  – коэффициент турбулентного массообмена;
- $\beta$  – коэффициент массообмена (массоотдачи);
- $\delta$  – толщина слоя;
- $\varphi$  – степень полноты тепловыделения;
- $\gamma_j$  – показатель адиабаты;
- $\gamma_j$  – молярная доля  $j$ -го компонента смеси;
- $\theta$  – доля поверхности;
- $\eta$  – коэффициент полезного действия (КПД);
- $\kappa$  – коэффициент температуропроводности;
- $\lambda$  – коэффициент теплопроводности; теплота алсорбции;
- $\Lambda$  – средняя длина свободного пробега молекул;
- $\mu$  – количество молей газа;
- $\nu$  – кинематическая вязкость;
- $\xi$  – отношение концентрации реагентов;
- $\rho$  – плотность;
- $\Phi$  – свободная энтальпия (энергия Гиббса);
- $\tau$  – время.

## Индексы

- $i$  – начальное состояние;
- $e$  – конечное состояние;
- $t$  – турбулентный процесс;
- $f$  – процесс на фронте пламени.

В разных разделах книги дополнительно вводятся обозначения других величин и состояний, а также иные определения величин, которые оговариваются в тексте.

В отдельных разделах книги используется устаревшая к настоящему времени единица измерения 1 калория (химическая), в этом случае она может быть переведена в систему СИ (SI) из расчета 1 кал = 4,184 Дж.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### 1.1. Связь процессов горения, пиролиза и газификации

Горение, пиролиз и газификацию следует рассматривать как единый и неразрывный процесс термической конверсии, в основе которого лежит общий физико-химический процесс интенсивного окисления топлива.

Окисление в общем смысле слова охватывает все процессы соединения топлива со свободным или связанным в химических соединениях кислородом, включая прямое окисление, реакции с диоксидом углерода и водяным паром и др. Так называемые восстановительные процессы (например,  $CO_2 + C = 2CO$ ) являются в то же время окислительными по отношению к углероду.

Процессы термической конверсии любого вида твердого топлива включают в себя некоторые или все из следующих процессов:

**Пиролиз:** *твердое топливо + тепло* → *полукокс* (кокс, масло, газ).

**Пиролиз** твердого топлива относится к термохимическим процессам переработки твердого топлива путем нагревания без доступа кислорода (воздуха) – коксование и полукоксование. Процесс этот может производиться, как при помощи подвода внешнего тепла без доступа окислителя (аллотермический процесс), так и с использованием внутреннего тепла за счет сжигания части топлива (автотермический процесс). При этом процесс **коксования** протекает при температуре 1000–1100 °С, а полукоксования – при температуре порядка 500–600 °С. Процессы коксования и полукоксования иногда называют еще и пиро-генетической переработкой твердого топлива.

**Газификация:** *твердое топливо + кислород* (в ограниченном количестве) → *генераторный газ* (силовой, синтез-газ и газы для специального использования, например, в качестве восстановителей и пр.).

Таким образом, **газификация** является термохимическим процессом переработки твердого топлива путем взаимодействия его с кислородом, водяными парами и др. с целью превращения топлива в горючий газ (смесь  $CO$ ,  $H_2$  и др.), предназначенный либо для последующего сжигания (энергетический и бытовой газ), либо для дальнейших технологических процессов, в качестве промежуточного продукта, (технологический синтез-газ).

**Сжигание (полное горение):** *твердое топливо + стехиометрический кислород* → *горячие продукты сгорания*.

Таким образом, **сжигание** является интенсивным окислительным процессом полного соединения горючей части топлива и кислорода, сопровождающийся максимальным выделением тепла и получением продуктов полного окисления – дымовых (негорючих) газов ( $CO_2$ ,  $H_2O$  и др.) и твердого негорючего остатка – золы и шлаков. Сжигание топлива может быть медленным (процесс медленного окисления) и более интенсивным, т.е. горением. **Горение** отличается от так называемого медленного окисления значительно большей интенсивностью реакций и выделения тепла.

Общая основа этих процессов – химическое соединение кислорода с углеродом топлива, сопровождающееся одними и теми же вторичными реакциями. В настоящее время можно с уверенностью констатировать, что ни один огневой газификационный процесс не протекает без глубокого развития сопутствующего ему процесса горения так же, как ни один процесс горения не протекает без глубокого развития сопутствующих ему газификационных процессов. При этом начальным этапом обоих процессов является процесс пиролиза – термохимического разложения исходного топлива.

Между процессами горения и газификации имеются и определённые различия. Основное различие заключается в направлении использования тепла горения топлива. При

**Введение в теорию газификации  
в ПЛОТНОМ СЛОЕ**

Подписано в печать 03.06.2020 г.  
Формат 60x84 1/16. Гарнитура Times New Roman.  
Усл.п.л. 10,25. Тираж 50 экз. Заказ №152.



**ШАҢЫРАҚ-МЕДИА**  
БАСПАЛАМА  
ТИПОГРАФИЯСЫ

Опечатано в типографии ТОО «Шаңырақ-Медиа»  
г. Нур-Султан, ул. Кокарал, 2/1  
тел. 8 7172 57 99 06, 8 707 777 00 66