

Э.П.ВОЛКОВ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Том 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ
И ПИРОЛИЗА ТВЕРДОГО
ТОПЛИВА

МОЕЙ ЖЕНЕ И ДРУГУ
ВАЛЕНТИНЕ ИВАНОВНЕ ВОЛКОВОЙ
ПОСВЯЩАЕТСЯ

Э.П.ВОЛКОВ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

В пяти томах

Москва
Издательский дом МЭИ
2014

Э.П.ВОЛКОВ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Том 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ
И ПИРОЛИЗА ТВЕРДОГО
ТОПЛИВА

Москва
Издательский дом МЭИ
2014

УДК 621.311.22:502.5
ББК 31.37:20.18
В 676

Волков Э.П.

В 676 Избранные труды. В 5 т. / Э.П. Волков. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014 — .

ISBN 978-5-383-00877-5

Том 3. Моделирование процессов горения и пиролиза твердого топлива. 2014. — 502 с.: ил.

ISBN 978-5-383-00883-6

Изложены современные методы математического моделирования процессов тепломассопереноса при горении и пиролизе твердого органического топлива. Приведены методы построения математических моделей для расчета турбулентных химически реагирующих дисперсных потоков. Представлены численные результаты моделирования свободных и внутренних турбулентных газодисперсных потоков, а также двумерных и трехмерных течений в аппаратах с реальными геометрическими характеристиками (горелочные устройства, камеры сгорания, пиролизеры). Даны методы расчета процессов сжигания твердого топлива в высококонцентрированных дисперсных потоках в циркуляционных системах и замкнутых системах пиролиза.

Для научных работников и инженеров, специализирующихся в области математического моделирования газодинамических и тепловых процессов.

Табл. 14. Ил. 176. Библиогр. 440 назв.

554359

УДК 621.311.22:502.5
ББК 31.37:20.18

ISBN 978-5-383-00883-6 (т.3)
ISBN 978-5-383-00877-5

© Волков Э.П., 2014
© ЗАО «Издательский дом МЭИ», 2014



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	8
Предисловие автора.....	10
Часть I. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА	13
<i>Глава первая. Газодинамика и теплообмен низкоконцентрированных дисперсных турбулентных потоков</i>	15
1.1. Современные методы расчета газодисперсных турбулентных потоков.....	15
1.2. Взаимодействие частиц с газовым потоком.....	17
1.3. Описание движения и теплообмена дисперсной фазы.....	22
1.4. Описание движения и теплообмена газовой фазы.....	48
1.5. Влияние переменности физических свойств и параметров процесса горения на газодинамику и теплообмен дисперсных турбулентных потоков ...	69
<i>Глава вторая. Моделирование процессов переноса импульса и тепла в осесимметричных газодисперсных турбулентных потоках</i>	85
2.1. Прямоточные струйные течения.....	85
2.2. Течения в прямоточных камерах сгорания.....	102
2.3. Закрученные течения в струях и вихревых камерах сгорания.....	110
<i>Глава третья. Физико-химические процессы при горении твердого топлива</i>	124
3.1. Характеристики твердого топлива и стадии горения.....	124
3.2. Моделирование выделения и горения летучих.....	128
3.3. Диффузионно-кинетическая теория горения углерода.....	134
3.4. Модели горения частиц высокозольного топлива.....	148
3.5. Влияние флуктуаций температуры на горение частиц.....	152
3.6. Образование оксидов азота.....	161
<i>Глава четвертая. Горение полидисперсной системы частиц</i>	169
4.1. Методы учета полидисперсности твердого топлива.....	169
4.2. Расчет выгорания полидисперсного топлива на основе модели сжимающейся частицы.....	171
4.3. Влияние дисперсии энергии активации на выгорание пылевидного топлива ...	179
4.4. Выгорание твердого топлива в циркуляционных системах.....	183
<i>Глава пятая. Перенос энергии излучения и радиационный теплообмен</i>	201
5.1. Радиационный теплообмен одиночной частицы.....	201
5.2. Методы расчета переноса энергии излучения и радиационного теплообмена в сплошных средах.....	202

5.3. Радиационные свойства дисперсных сред.....	213
Глава шестая. Факельное сжигание топлива.....	223
6.1. Горение мелкодисперсного твердого топлива в турбулентном потоке	223
6.2. Горение газообразного топлива.....	231
6.3. Факельное сжигание твердого топлива	247
Глава седьмая. Моделирование топочных процессов при сжигании пылеугольного топлива в камерных топках энергетических котлов	269
7.1. Газодинамика дисперсного турбулентного потока.....	269
7.2. Горение, тепломассоперенос и перенос энергии излучения	286
7.3. Образование оксидов азота в топочной камере котла П-57	310
Глава восьмая. Сжигание твердого топлива в высококонцентрированных дисперсных потоках	312
8.1. Особенности моделирования процесса горения в высококонцентрированных дисперсных потоках	312
8.2. Математическая модель для расчета горения в кипящем слое	314
8.3. Сжигание топлива в топке с циркулирующим кипящим слоем.....	318
8.4. Двухступенчатое сжигание высокозольного топлива в топке с циркулирующим аэрофонтанным слоем.....	330
Часть II. КИНЕТИКА И ГИДРОДИНАМИКА ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ТВЕРДОГО ТОПЛИВА	345
Глава девятая. Механизм пиролиза твердого топлива, его модели и схемы технологического использования	347
9.1. Химическая структура органической массы твердого топлива и ее разрушение при высоких температурах	347
9.2. Математическое моделирование процесса пиролиза твердого топлива	351
9.3. Энерготехнологические процессы и установки для переработки твердого топлива	358
Глава десятая Математическая модель пиролиза низкосортных углей и сланцев с учетом покомпонентного выхода продуктов.....	368
10.1. Кинетика выхода функциональных групп из угля.....	368
10.2. Кинетика химических превращений в газовой фазе.....	371
10.3. Исходная информация и банк данных по кинетике процессов.....	377
10.4. Пиролиз одиночной частицы твердого топлива.....	386
10.5. Инженерный метод расчета реакторов-пиролизеров бункерного типа.....	393
10.6. Некоторые рекомендации по конструкции пиролизера бункерного типа	405
Глава одиннадцатая. Математическое моделирование процесса пиролиза и его гидродинамики	408
11.1. Общая концепция пиролиза.....	408
11.2. Изотермический выход летучих	410
11.3. Общий анализ стационарного изотермического выхода летучих в пиролизере	414

11.4. Общая гидродинамическая теория изотермического процесса пиролиза.....	427
11.5. Учет гомогенной реакции с модельной кинетикой в изотермическом процессе пиролиза в приближении регулярного режима.....	434
11.6. Общая схема расчета процесса изотермического пиролиза в приближении регулярного режима.....	439
Глава двенадцатая. Численная реализация моделей теплообмена и гидродинамики пиролиза.....	447
12.1. Теплообмен сферической частицы с температурно-однородной оболочкой ...	447
12.2. Перераспределение тепла в теплоизолированной сферической двухслойной частице.....	450
12.3. Исходные данные, оценки, расчеты и обсуждение результатов для случая изотермического пиролиза.....	461
12.4. Граничные условия на конечных участках пиролизера.....	474
Список литературы.....	480

ПРЕДИСЛОВИЕ

Человечество с самого начала своего существования (около 500 тыс. лет тому назад) использовало огонь вместо обточенных камней в качестве инструмента для производства различных полезных продуктов. И только сравнительно недавно (за несколько тысяч лет до установления эры христианства) оно узнало, как с помощью огня можно изготавливать инструменты и оружие сначала из бронзы, затем из других металлов, для производства которых требовалась все более высокая температура. Так мы пришли к использованию древесного угля в качестве топлива, а само топливо стали получать с помощью частичного сжигания дерева (некая разновидность пиролиза). Все это приводило к уничтожению лесов, и необходимо было заменить дерево на другое вещество. Появились уголь и продукт его термической переработки — кокс, а вместе с этим и спонтанные неосознанные технологии его производства (опять на базе пиролиза). Эти технологии возникли и были освоены до того, как зародилась современная наука. По аналогии люди плавали и строили суда задолго до того, как Архимед произнес свое знаменитое слово «эврика». Наука осмысливает явления природы, поэтому она почти всегда опаздывает. Но в то же время с помощью математических методов она обобщает результаты эмпирических наблюдений, которые доводятся до состояния, когда ими могут пользоваться инженеры. И вот уже за изучение пиролиза взялись современные ученые. Они публикуют книги по этому вопросу, что можно только приветствовать.

Научный подход оказался также весьма успешным в освоении открытий Архимеда, касающихся гидростатики и законов рычага. На его основе начали понимать и осваивать явления механики, в том числе гидродинамики. Появились компьютерные программы, которые дают количественные ответы на вопросы, возникающие у инженеров. Началась эпоха математического моделирования сложных процессов, в том числе процессов горения и пиролиза топлива. Именно этим вопросам и посвящена монография проф. Э.П.Волкова. Здесь даются не конкретные сразу используемые знания, а методология, подходы к осознанию явлений и получению конкретных результатов, в том числе и отдельных результатов в отношении горения топлива в котельных установках тепловых электростанций. Материал книги представляет собой три тесно переплетенных направления, причем до появления этой книги каждое из них анализировалось отдельно. Они еще не были объединены и не рассматривались совместно в научном плане, как это сделано в представляемом труде.

Этими направлениями являются:

1) химические процессы, которые достаточно изучены для утверждения того факта, что окисление даже самого простого углевода CH_4 приводит к созданию и разрушению очень многих промежуточных образований или элементов, которые могут определяться формулой $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_k$ с индексами 0,1 или 2, приписываемыми каждому элементу. При этом невозможно с уверенностью сказать, в какой степени их образование или деструкция зависят от концентрации и температуры;

2) турбулентность, для которой используемые модели (к сожалению, дискутируемые) имеются только в случае однофазного течения; когда они распространяются на течения со взвешенными частицами в газе, они становятся вдвойне дискутируемыми;

3) радиационный перенос, для которого только некоторые его виды (для воображаемых абсолютно черных тел) имеют зависимости интенсивности излучения от температуры и длины волны и для которого компьютерные методы расчета существуют, когда они точны и подходящи для более чем очень простых геометрических форм. Кроме того, радиационные свойства реальных веществ редко известны с необходимой точностью. При этом несмотря на нерешенность отдельных проблем остается надежда их разрешить и продолжается работа.

«Моделирование» — важный термин в заглавии книги; моделирование не претендует, как претендует классическая наука, быть точным и универсальным средством. Для моделирования термины «приблизительно», «в общих обстоятельствах» и «как компромисс между точностью и возможностью» являются приемлемыми. Природа и использование такого подхода хорошо отражены в книге проф. Э.П. Волкова.

В предисловии я попытался отразить вклад проф. Э.П. Волкова и его коллег в создании методов научного предсказания по крайней мере некоторых характеристик процессов сжигания и пиролиза твердого топлива, а также в разработке методик и средств для расчета этих процессов. Эти методы может быть еще не позволяют рассчитывать со 100 %-ной точностью новое (инновационное) оборудование, но совершенно очевиден прогресс в этом направлении. В итоге мы получили превосходную книгу, позволяющую глубоко и всесторонне осмыслить важные в техническом отношении технологические процессы.

Член Королевского общества Великобритании,
иностраный действительный член
Российской академии наук

Брайан Д. Сполдинг

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

В настоящее время при расчете установок для сжигания твердого топлива, как правило, используются полуэмпирические методы, основанные на балансовых соотношениях для массовых и тепловых потоков. Однако по мере совершенствования технологий сжигания становится очевидным, что протекание физико-химических процессов, определяющих эффективность термической переработки топлива, в существенной степени обусловлено турбулентной структурой формирующихся течений. В соответствии с этим ключевой проблемой как в теоретическом, так и в прикладном отношении является построение теории турбулентных дисперсных химически реагирующих потоков. Информация о внутренней структуре течений имеет особенно важное значение для понимания и оптимизации следующих процессов: динамики твердых и жидких частиц топлива в турбулентных факелах и камерах сгорания; осаждения шлакозольных частиц на поверхностях нагрева и сепарации их в пылеуловителях; турбулентного смешения при газификации топлива и образовании оксидов азота; циркуляции частиц топлива в высококонцентрированных дисперсных системах сжигания.

В книге изложены современные методы математического моделирования процессов теплопереноса при горении и пиролизе твердого органического топлива. Представлены методы расчета практически всей совокупности физико-химических процессов, протекающих при сжигании органического твердого топлива: газодинамики и теплопереноса в газодисперсных средах; горения полидисперсной системы частиц; переноса энергии излучения, выделения летучих и образования оксидов азота. Большая часть материала книги посвящена моделированию низкоконцентрированных газодисперсных турбулентных потоков при факельном способе сжигания пылевидного топлива. Моделирование процессов в химически реагирующих турбулентных газодисперсных потоках базируется на подходе, в основу которого положено континуальное описание дисперсной фазы и использование уравнений для плотностей вероятностей распределения частиц топлива по скоростям, температурам, размерам и др. Представлены различные модели выгорания частиц топлива, учитывающие наличие

пористой структуры, золы оболочки, диффузионного сопротивления транспортировке окислителя. Построены модели для анализа влияния флуктуаций температуры и энергии активации на гетерогенное горение. Развита теория расчета выгорания топлива в циркуляционных системах, когда имеет место возврат несгоревшего топлива в камеру сгорания. Представленные в книге теоретические модели применяются для расчета прямоточных и вихревых горелочных устройств и камер сгорания при сжигании пылевидного топлива, а также для двумерного и трехмерного моделирования топочных процессов в камерных топках котлов. В конце ч. I книги изложена теория расчета горения твердого топлива в высококонцентрированных дисперсных потоках применительно к аппаратам с кипящими слоями и циркулирующими кипящими или аэрофонтанными слоями.

Естественно, в книге нашли отражение далеко не все вопросы, связанные с горением твердого топлива, а некоторые процессы (в частности, кинетика химических реакций) освещены весьма фрагментарно, что объясняется невозможностью в одной книге с одинаковой глубиной охватить все аспекты такой сложной проблемы.

Основу ч. I книги составляют результаты, полученные автором совместно с докторами технических наук Л.И. Зайчиком и В.А. Першуковым, однако также достаточно полно здесь отражены наиболее значительные достижения зарубежных и отечественных исследователей в области моделирования процессов сжигания твердого топлива.

Часть II книги посвящена актуальной в настоящее время проблеме — исследованию процессов пиролиза угля и сланца. Данное направление исследований интенсивно развивается в последнее время в связи с созданием целого ряда энерготехнологических установок промышленного масштаба. Такие установки введены в эксплуатацию в последние два десятилетия в различных странах мира. Среди них следует отметить установку УТТ-3000, разработанную сотрудниками Энергетического института (ЭНИИ) им. Г.М. Кржижановского, в которой используется процесс пиролиза сланца с помощью твердого теплоносителя для получения искусственной нефти и высококалорийного газа и которая является наиболее эффективной в мире как по теплотехническим, так и по экономическим и экологическим показателям. Для создания подобной установки важны понимание процесса пиролиза твердого топлива и создание его математических моделей, чему и посвящена ч. II настоящей монографии.