

Е. А. Бойко

РЕАКЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ

монография

политехнический институт



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сибирский федеральный университет

Е. А. БОЙКО

**РЕАКЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ**

Монография

Красноярск
СФУ
2011

УДК 621.45
ББК 31.35
Б72

Рецензенты:

А. С. Заворин, д-р техн. наук, проф. зав. каф. «Котло- и парогенераторостроение» Национального исследовательского Томского политехнического университета;

Д. М. Маркович, д-р физ.-мат. наук, проф. зам. директора по науке Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск)

Бойко, Е. А.

Б72 Реакционная способность энергетических углей : монография / Е. А. Бойко. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2011. – 608 с.
ISBN 978-5-7638-2104-8

Рассмотрены с точки зрения взаимосвязи состав, строение, теплотехнические и реакционные характеристики твердого органического топлива. Показано влияние степени метаморфизма угля на его реакционную способность в реальных процессах топливоиспользующих устройств. Оценка реакционной способности твердого топлива выполнена методом комплексного термического анализа на основе дериватографии и газовой хроматографии. Усовершенствована схема экспериментальной установки и методология проведения и обработки данных термического анализа различных этапов и процессов термохимического превращения твердого топлива. Приведены результаты и показаны перспективы комплексного исследования и учета реакционной способности энергетических углей в практике моделирования и совершенствования теплотехнологических процессов и оборудования.

Предназначена для работников научно-исследовательских и проектных институтов, а также студентов вузов, специализирующихся в области теории горения, топочных процессов, газификации и термической переработки твердых органических топлив.

**УДК 621.45
ББК 31.35**

ISBN 978-5-7638-2104-8

© Сибирский федеральный
университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	8
1. Оценка и учет реакционной способности углей при расчете и проектировании энергетических котлов и их топочных устройств.....	10
1.1. Опыт использования твердых органических топлив в энергетике на примере канско-ачинских углей.....	10
1.1.1. Геологическая карта Канско-Ачинского угольного бассейна.....	12
1.1.2. Теплотехнические свойства канско-ачинских бурых углей.....	12
1.1.3. Особенности сжигания бурых углей Канско-Ачинского бассейна.....	20
1.2. Пути совершенствования технологий производства и потребления энергии, вырабатываемой на твердом органическом топливе.....	29
1.3. Исследование процессов термохимического превращения твердого органического топлива методом математического моделирования.....	35
1.4. Современное состояние теории горения пылевидного твердого топлива.....	39
1.4.1. Химическая структура и реакционная способность углей.....	39
1.4.2. Стадийность процесса горения пылеугольных частиц	46
1.4.3. Роль процессов сушки, прогрева и выделения летучих веществ при пылеугольном сжигании.....	50
1.4.4. Формирование структуры коксового остатка и природа тепловых потерь с неполнотой сгорания.....	58
1.4.5. Горение и газификация коксовой основы.....	62
1.4.6. Методы оценки и учета реакционной способности энергетических углей.....	71
1.5. Исследование механизма и кинетики процессов термохимического превращения углей методом комплексного термического анализа.....	81
1.5.1. Характеристика экспериментальных методов термического анализа.....	81
1.5.2. Промышленные приборы для термического анализа...	84
1.6. Учет качества топлива при расчете и проектировании энергетических котлов и их топочных устройств.....	87

2. Комплексный термический анализ: аппаратное оформление, экспериментально-расчетное обоснование условий определения технических и реакционных характеристик твердых органических топлив.....	95
2.1. Совмещенная схема и аппаратное оформление комплексного термического анализа твердых органических топлив.....	95
2.2. Экспериментально-теоретическое обоснование рекомендаций по выбору условий проведения комплексного термического анализа для оценки реакционной способности различных стадий термохимической обработки пылевидного топлива....	104
2.2.1. Влияние теплообмена на поверхности образца.....	110
2.2.2. Влияние скорости нагрева на результат термоаналитического эксперимента.....	114
2.2.3. Влияние размеров пылеугольных частиц на характер термических кривых.....	126
2.2.4. Обоснование рекомендаций по определению условий проведения комплексного термического анализа углей	130
2.3. Технический анализ твердого топлива.....	136
2.3.1. Применение комплексного термического анализа для определения влажности и выхода летучих веществ твердых органических топлив.....	136
2.3.2. Применение комплексного термического анализа для определения зольности твердого органического топлива.....	139
2.3.3. Сопоставление результатов термического анализа технических характеристик угля в различных газовых средах.....	143
2.3.4. Применение комплексного термического анализа для определения теплоты сгорания твердого органического топлива.....	145
3. Теоретическое обобщение и развитие математического аппарата неизотермической кинетики.....	152
3.1. Особенность протекания процессов термохимического превращения твердого органического топлива в условиях реальных топливоиспользующих установок.....	152
3.2. Неизотермическая кинетика термической деструкции твердых органических топлив.....	157
3.3. Теоретические основы неизотермической кинетики процесса горения коксовой основы твердых органических топлив.....	169
3.4. Методика экстраполяции данных комплексного термического анализа на различные скорости нагрева.....	172

4. Комплексный термический анализ: методика и результаты определения реакционной способности энергетических углей	178
4.1. Кинетика процесса испарения влаги	178
4.1.1. Анализ подходов к исследованию кинетики сушки углей	178
4.1.2. Методика и результаты определения кинетических параметров процесса испарения влаги.....	183
4.2. Кинетика термической деструкции твердых органических топлив.....	191
4.2.1. Качественная оценка совместного протекания процессов выделения летучих веществ и выгорания коксовой основы твердых органических топлив в условиях медленного нагрева.....	196
4.3. Выделение летучих веществ при нагревании твердых органических топлив с различными скоростями. Экстраполяция результатов лабораторного эксперимента применительно к условиям реальных топливоиспользующих установок.....	212
4.3.1. Определение кинетических характеристик процесса выделения летучих веществ в условиях лабораторного эксперимента.....	213
4.3.2. Кинетика индивидуальных реакций выделения газообразных горючих веществ и расчетный прогноз их протекания в условиях высокоскоростного нагрева....	224
4.4. Экспериментально-расчетный метод оценки кинетики многостадийных процессов термохимического превращения твердых органических топлив. Алгоритмическое и программное обеспечение обработки результатов термоаналитического эксперимента.....	229
4.5. Кинетика горения коксового остатка.....	252
4.5.1. Методика определения кинетических параметров горения коксового остатка твердого органического топлива.....	253
4.5.2. Экстраполяция результатов лабораторного эксперимента по определению кинетики выгорания коксового остатка применительно к реальным топочным условиям.....	263
4.6. Кинетика взаимодействия углекислого газа и водяных паров с коксовым остатком твердых органических топлив.....	265
4.7. Кинетика термических превращений химических компонентов минеральной части углей.....	275

5. Экспериментальные исследования процесса термохимического превращения твердого органического топлива в условиях лабораторных, полупромышленных и промышленных установок.....	296
5.1. Кинетика термохимического превращения твердого органического топлива при высокоскоростном нагреве в условиях лабораторного эксперимента.....	296
5.1.1. Экспериментальная установка и методика проведения исследований.....	300
5.1.2. Сопоставление результатов комплексного термического анализа и лабораторного эксперимента высокоскоростного нагрева по определению видимых констант скоростей горения пылевидного твердого органического топлива.....	305
5.2. Экспериментальные исследования процесса термохимического превращения пылевидного твердого органического топлива в условиях полупромышленной установки.....	321
5.2.1. Описание экспериментального стенда и конструкции устройства для термической обработки твердых органических топлив. Методика проведения исследований.....	323
5.2.2. Анализ результатов испытаний устройства и исследования процесса термохимической обработки твердого органического топлива на примере березовских углей разной степени окисленности.....	333
5.3. Экспериментальные исследования процесса термохимического превращения пылевидного твердого органического топлива в условиях промышленных энергетических установок.....	364
5.3.1. Результаты опытно-промышленных испытаний котла БКЗ-320-140 ТЭЦ АГК при сжигании ирша-бородинского угля.....	364
5.3.2. Результаты опытно-промышленных испытаний котла БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2 при сжигании канско-ачинских углей.....	402
5.3.3. Результаты опытно-промышленных испытаний котла П-67 Березовской ГРЭС при сжигании березовских углей.....	415
6. Аналитические исследования процесса термохимического превращения твердого органического топлива в пылевидном состоянии.....	433
6.1. Физико-химическая модель термохимического превращения твердого органического топлива в пылевидном состоянии.....	433

6.2. Кинетическая модель процесса термохимического превращения твердого органического топлива.....	437
6.3. Диффузионно-кинетическая модель процесса термохимической обработки пылеугольных частиц.....	452
6.4. Температурно-временной режим термохимической обработки пылеугольных частиц.....	470
7. Внедрение результатов комплексного метода определения реакционной способности углей в практику их энергетического использования.....	476
7.1. Совершенствование методики и разработка алгоритмического и программного обеспечения совместного расчета степени выгорания и теплообмена в топочных камерах паровых котлов	476
7.1.1. К вопросу о сажеобразовании при сжигании бурых углей в пылевидном состоянии.....	476
7.1.2. Совершенствование методики расчета выгорания пылеугольного факела.....	486
7.1.3. Расчетная оценка процесса выгорания бородинского угля в зоне активного горения котельного агрегата БКЗ-320-140 ТЭЦ АГК.....	507
7.2. Разработка имитационной динамической модели пылеугольной топки, учитывающей процесс горения, и создание на ее основе тренажерных комплексов рабочих процессов топочных устройств.....	515
7.3. Практическое использование комплексного термического анализа для разработки рациональных и эффективных способов, устройств и режимов подготовки и сжигания твердых органических топлив в пылевидном состоянии.....	525
7.3.1. Обоснование требований к организации процесса подготовки и сжигания твердого органического топлива с учетом его исходного качества.....	525
7.3.2. Разработка технических решений по совершенствованию способов и устройств подготовки и сжигания пылевидного твердого органического топлива	537
7.3.3. Методика и результаты теплового расчета устройства для предварительной термической обработки пылевидного твердого органического топлива.....	559
7.3.4. Оценка экономической эффективности практического использования предложенных технических решений...	564
Заключение.....	573
Библиографический список.....	580

ПРЕДИСЛОВИЕ

Согласно «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» твердое органическое топливо рассматривается в качестве основного сырьевого источника для производства энергии на длительную перспективу. Совершенствованию технологии производства и потребления энергии, вырабатываемой на твердом органическом топливе, уделяется значительное внимание в энергетической, углехимической, металлургической и других отраслях промышленности. Создание новых и повышение эффективности существующих технологических приемов термохимической обработки, сжигания и газификации твердых горючих ископаемых основано на всесторонней оценке их состава и свойств. Технологии производств, так или иначе связанных с использованием процессов испарения влаги, термического разложения и взаимодействия топлива с окислителем, предусматривают в качестве неперемennого условия оценку его реакционной способности. При этом необходимо учитывать специфические для каждой марки угля сложные кинетические механизмы большого класса недостаточно исследованных явлений термохимического превращения органической и минеральной части пылевидного твердого топлива. Значительный разброс и неполнота экспериментальных значений кинетических параметров, определяющих реакционную способность, а также отсутствие обобщающих методических работ по определению этих параметров применительно к основным этапам термохимического превращения твердого органического топлива в условиях реальных теплотехнологических процессов и установок, предопределили основные положения исследований в рамках самостоятельного научного направления «Реакционная способность углей».

Достаточно эффективным средством исследования механизма и кинетики процессов термохимического превращения твердого органического топлива является использование методов комплексного термического анализа и математического моделирования. Перечисленные методы нашли широкое применение в практике научных исследований, однако сложность исследуемых процессов требует их дальнейшего совершенствования. Следует отметить, что имеет место необъективность при оценке и интерпретации получаемых результатов, а иногда и явно ошибочные гипотезы. Феноменологическое описание нуждается в дополнительной информации, главным образом структурного характера, что особенно важно при исследовании динамики процессов.

Разработка комплексного метода оценки реакционной способности энергетических углей, математических моделей и методик расчета термохимического превращения твердого органического топлива и обоснование на их основе технических и технологических решений по повышению эф-

фективности энергетического использования углей имеют существенное значение для ускорения научно-технического прогресса в топливно-энергетическом комплексе страны и являются важными народно-хозяйственными задачами.

В предлагаемой книге представлен материал, отражающий вопросы совершенствования и внедрения комплексного метода исследования реакционной способности твердых органических топлив в практику физического и математического моделирования теплотехнологических процессов и устройств для повышения эффективности проектных и технических решений энергетического использования углей.

Монография написана на основе научно-исследовательских работ, выполненных на кафедре «Тепловые электрические станции» ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». С методической точки зрения содержание книги представляет интерес для аспирантов и студентов теплоэнергетической направленности вузов при изучении учебных дисциплин «Теория горения», «Котельные установки и парогенераторы», «Теплогенерирующие установки».

Автор выражает огромную благодарность и глубокую признательность всем сотрудникам кафедры «Тепловые электрические станции» Политехнического института ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» за помощь и активное участие в проведении научных исследований, результаты которых изложены в книге, а также инженерно-техническому персоналу ОАО «Енисейская ТГК (ТГК-13)», Красноярской ТЭЦ-1, Красноярской ТЭЦ-2, Назаровской ГРЭС, Минусинской ТЭЦ, ТЭЦ Ачинского глиноземного комбината, Березовской ГРЭС-1 за неоценимую поддержку при внедрении результатов исследований.

Автор заранее благодарен за все замечания и предложения по книге, которые следует направлять по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, Политехнический институт ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» или по адресу электронной почты EBoiko@sfu-kras.ru.