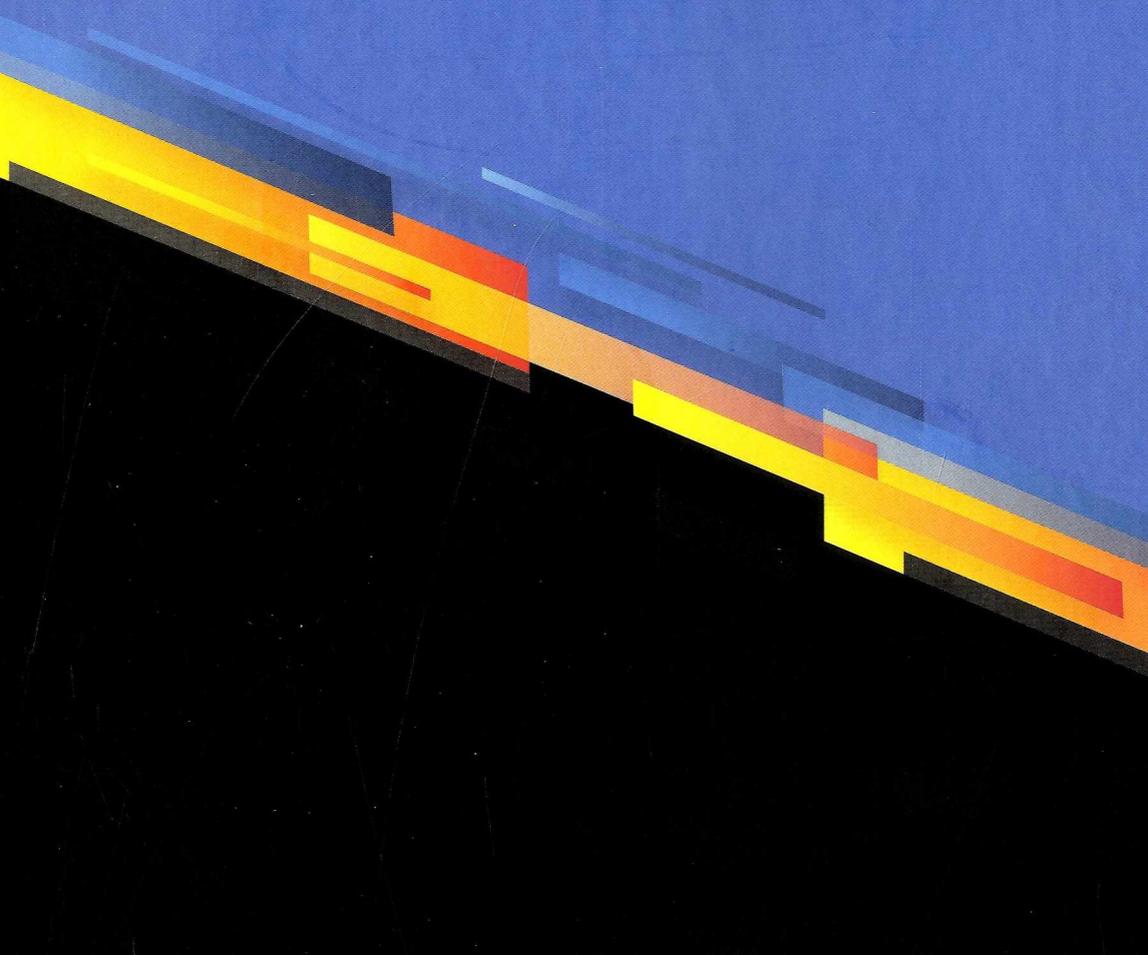


С. Р. Исламов

Частичная газификация угля



С.Р. Исламов

ЧАСТИЧНАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ УГЛЯ

Второе издание,
переработанное и дополненное

Красноярск
2024

УДК 622.7
ББК 35.513.2

Исламов С. Р.

И87 Частичная газификация угля / С. Р. Исламов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Красноярск: ООО «Издательство Поликор», 2024. — 400 с.: табл.; ил.

ISBN 978-5-6049181-9-7

В книге обоснована энерготехнологическая концепция «Термококкс», которая радикальным образом повышает экономическую эффективность использования углей с высоким содержанием летучих веществ при обеспечении предельно высокого уровня экологической безопасности.

Уголь рассматривается прежде всего как ценное сырье, которое с помощью процессов частичной газификации целесообразно превращать в газовое топливо и высокореакционный углеродный продукт — термококкс. Этот технологический прием открывает новые перспективы и переводит уголь в категорию стратегически важных экономических ресурсов, снимая с него клеймо самого грязного вида топлива.

В издании представлен критический анализ перспектив использования классических технологий глубокой переработки угля. Изложены экспериментальные основы процессов частичной газификации угля, рассмотрены физико-химические свойства термококкса и генераторного газа, а также потенциальные сферы применения этих продуктов. Большое внимание уделено технико-экономическим аспектам применения технологических процессов серии «Термококкс».

Второе издание книги переработано и дополнено новыми разделами.

Предназначено для научных и инженерно-технических работников, экспертов инвестиционных компаний, преподавателей, аспирантов и студентов технических вузов топливно-энергетического и металлургического профиля.

553211



© Исламов С. Р., 2024

Содержание

Предисловие	7
Предисловие автора	9

ЧАСТЬ I

ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЯ

1. Уголь и наша цивилизация	14
1.1. Роль угля в индустриализации мира	14
1.2. Краткая история термической переработки угля	17
1.3. Уголь как переходное топливо на пути к энергетике будущего	27
1.4. Экологические последствия сжигания натуральных топлив	40
2. Состояние и перспективы глубокой переработки угля в России	50
2.1. Анализ итогов государственной программы СССР по развитию глубокой переработки угля	50
2.2. Брикетирование угля	57
2.3. Газификация угля	61
2.4. Производство моторных топлив из угля	65
2.5. Пиролиз угля	78
2.6. Малотоннажные технологии переработки угля	91
2.7. Оценка перспектив глубокой переработки угля	93
Литература	98

ЧАСТЬ II

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

3. Тепловая волна — основа горения и газификации твердого топлива	104
3.1. Тепловые волны в активных средах	104
3.2. Тепловые волны горения в гомогенной среде	107
3.3. Тепловые волны горения в гетерогенной среде	114
3.4. Тепловая волна как физическая основа процесса газификации твердого топлива	120
3.5. Специфика тепловых волн при газификации угля	125
4. Технологические расчеты процесса газификации угля	131
4.1. Особенности расчета одномерных проточных реакторов	131
4.2. Метод расчета квазиравновесного состава газовой смеси	134
4.3. Формулы для расчета основных показателей технологии газификации угольной пыли	141
4.4. Сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными	143

5. Пределы совершенствования технологии газификации угля	147
5.1. Взаимосвязь технологических показателей кислородной газификации угольной пыли	147
5.2. Технология кислородной газификации угольной пыли с твердым шлакоудалением (технология «КАТЭК»)	151
5.3. Экономический анализ технологии газификации угля	157
6. Концепция частичной газификации углей с высоким содержанием летучих веществ	166
6.1. К выбору оптимальной технологии переработки угля	167
6.2. Энерготехнологическая концепция «Термококс»	169
6.3. Сырьевая база для технологии частичной газификации угля	176
6.4. Сферы использования продукции частичной газификации угля	178
Литература	179

ЧАСТЬ III

ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ЧАСТИЧНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

7. Экспериментальное исследование поведения частиц бурого угля при термообработке	186
7.1. Качественный дифференциально-термический анализ процесса нагрева бурого угля	186
7.2. Термогравиметрия процесса сушки и пиролиза пластины бурого угля	190
7.3. Гравиметрия процесса сушки и пиролиза частиц бурого угля	195
7.4. Формальная кинетика потери массы при нагреве частиц бурого угля	202
8. Математическое моделирование процесса карбонизации угольных частиц	207
8.1. Методологические проблемы математического моделирования процессов переработки угля	207
8.2. Разработка физической модели карбонизации угольных частиц	219
8.3. Математическая модель карбонизации угольных частиц	229
8.4. Оценка значений параметров математической модели	234
8.5. Численное исследование процесса карбонизации бурого угля и оценка адекватности математической модели	241
9. Слоевая газификация угля с обращенным дутьем	248
9.1. Предпосылки для разработки технологического процесса	248
9.2. Особенности механизма теплопередачи в слое угля при газификации с обращенным дутьем	253
9.3. Экспериментальная установка и основные задачи исследования	257

9.4. Обсуждение результатов исследований	260
9.5. Особенности частичной газификации угля с кислородным дутьем	266
9.6. Частичная газификация торфяных пеллет	273
10. Частичная газификация угля в кипящем слое	280
10.1. Предпосылки для разработки технологического процесса	280
10.2. Экспериментальная установка и основные задачи исследования	283
10.3. Обсуждение результатов исследований	285
10.4. Особенности частичной газификации обогащаемых углей	290
10.5. Исследование сорбционных свойств бурого угольного кокса	292
11. Полукоксование угля под давлением	296
11.1. Предпосылки для разработки технологического процесса	296
11.2. Экспериментальная установка и основные результаты исследования	297
11.3. Оценка экономической эффективности производства полукокса высокого давления	302
Литература	303

ЧАСТЬ IV

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СЕРИИ «ТЕРМОКОКС»

12. Технологический процесс «Термококк-С»	309
12.1. Основные принципы и варианты технологических схем	309
12.2. Производство углеродного сорбента	312
12.3. Производство термококса из энергетических каменных углей	315
12.4. Экологические аспекты использования технологического процесса «Термококк-С»	316
12.5. Сравнительная оценка экономической эффективности полной и частичной газификации угля	320
13. Технологический процесс «Термококк-КС»	322
13.1. Основные принципы и технические решения	323
13.2. Промышленная реализация технологического процесса	328
13.3. Основные технические показатели и оценка экономической эффективности опытно-промышленного производства	329
14. Термококк как специализированное топливо и углеродный сорбент	332
14.1. Основные физико-химические свойства термококса	332
14.2. Возможности транспортировки мелкозернистого термококса на дальние расстояния	336

14.3. Смесевое технологическое топливо на основе буругольного кокса	337
14.4. Использование смесевое технологического топлива на глиноземных заводах	340
14.5. Использование смесевое технологического топлива на цементных заводах	341
14.6. Использование термококса в агломерационных процессах	343
14.7. Бездымное бытовое топливо	346
14.8. Использование термококса как углеродного сорбента.	348
15. Термококк как углеродистый восстановитель для традиционной металлургии	354
15.1. Формованный термококк для электрометаллургии	354
15.2. Термококк как пылеугольное топливо для вдувания в доменные печи	358
16. Концепция «Термококк» как технологическая платформа прямого восстановления железной руды	362
16.1. Технологический тупик традиционной металлургии стали	362
16.2. Тенденции развития недоменной металлургии	366
16.3. Прямое восстановление железа на основе технологии «Термококк-Fe»	370
16.4. Канско-Ачинский бассейн как сырьевая база для энергометаллургического производства	374
17. Применение генераторного газа из угля	376
17.1. Основные свойства газа из угля и сферы его использования	377
17.2. Сжигание генераторного газа для получения тепловой и электрической энергии	379
17.3. Прямое восстановление железной руды	381
18. Кластерная схема комплексного использования угля в ЖКХ	383
18.1. Общие проблемы коммунальной теплоэнергетики на угольном топливе и «эффект Улан-Батора»	384
18.2. Инновационный вариант решения проблемы теплоснабжения	388
Литература	391
Заключение	395

Предисловие

Человечество вступило в активную фазу энергетического перехода, которая характеризуется освоением новых источников первичной энергии, в первую очередь возобновляемых. Тем не менее продолжается интенсивное сжигание ископаемых топлив, причем в ежегодно возрастающих объемах. Очень важно, что значительная часть мирового энергопотребления обеспечивается углем. Отрицательные экологические последствия использования этого вида топлива, включая выбросы парникового газа CO_2 , влияющего на изменение климата, давно уже стали очевидными. Однако отказаться от него в обозримом будущем не представляется возможным. В то же время необходимо отдавать себе отчет о том, что в начале XXI в. мы продолжаем использовать экологически опасные технологии коксования и сжигания угля, разработанные еще в XVIII в. и по сути своей мало изменившиеся с тех пор (за исключением масштабов и интенсивности потребления угля). Поэтому возникает острая потребность в качественно новых подходах к решению энергетических и экологических проблем, связанных с использованием угля.

Генеральное направление в угольной теплоэнергетике связано с глубокой переработкой угля, прежде всего газификацией — неполным сжиганием угля и сопутствующим получением синтез-газа (смесь водорода и CO), который потом можно эффективно сжигать или использовать в химической технологии, в частности, извлекать водород для водородной энергетики. Существует (и довольно много лет) множество способов газификации, но они пока не получили широкого распространения, не выдерживая конкуренции с традиционными энергетическими технологиями. В энергетике на природном газе радикальным подходом является применение технологий с секвестированием CO_2 . В числе наиболее перспективных — цикл Аллама. Он заключается в сжигании природного газа в кислороде и использовании углекислого газа в сверхкритическом состоянии как рабочего тела вместо воды. За счет высоких параметров рабочего тела (температура газа $1150\text{ }^\circ\text{C}$, давление 300 атмосфер) достигается КПД до 59 %, полностью извлекается углекислый газ без выброса в атмосферу. Включение цикла Аллама в общий термодинамический цикл на угле дает новое качество. Для этого сначала

надо получить синтез-газ в процессе газификации угля, а затем использовать синтез-газ в цикле Аллама с итоговым КПД порядка 51 %. То есть реализуется цикл Аллама на угле с полным секвестированием углекислого газа. Таким образом полностью решается проблема удовлетворения требований Парижского соглашения — использование энергетических технологий без выбросов CO_2 .

В связи с указанными выше проблемами чрезвычайно важно, что в предлагаемой читателю книге предпринята попытка вырваться за пределы традиционных технологий. И, безусловно, эту попытку следует признать весьма успешной. Предложенная автором и глубоко проработанная энерготехнологическая концепция «Термококс» самым существенным образом изменяет экономическую и экологическую эффективность использования угля, создавая основы для будущей экологически чистой энергетики на органическом топливе с перспективой на нулевые выбросы CO_2 . Убедительно доказывается, что в рамках энерготехнологической схемы уголь является ценным сырьем для производства газового топлива и углеродной продукции с высокой потребительской стоимостью. Причем важно отметить, что таким сырьем являются низкосортные молодые угли.

Подробно изложены физико-химические основы технологии частичной газификации угля в виде серии новейших технологических процессов, многие из которых уже прошли опытно-промышленную апробацию.

Книга отличается выраженной практической направленностью. Значительная часть ее объема посвящена обсуждению потенциальных сфер промышленного применения новых технологических процессов, а также экологическим и экономическим аспектам их использования.

С. В. Алексеенко, академик РАН,
лауреат премии «Глобальная энергия»

Предисловие автора

Со второй половины XX в. взрывообразно ускоряется потребление сырьевых ресурсов, и в первую очередь всех видов топлива. При этом значительную долю в мировом топливно-энергетическом балансе занимает уголь. По данным Международного энергетического агентства, в 2023 г. добыча угля в мире достигла 8,7 млрд т. По современным меркам уголь — наименее технологичный вид топлива, который требует повышенных капитальных затрат как на процессы подготовки его к сжиганию или термической переработке, так и на компенсацию отрицательного воздействия на окружающую среду. Эффективность традиционных технологий сжигания и газификации угля приблизилась к термодинамическому пределу, и они практически исчерпали потенциал своего развития.

С началом нового века пришло осознание того, что экстенсивный рост объемов сжигания топлива ведет к необратимым экологическим и климатическим изменениям по сути катастрофического характера. Однако человечество не в состоянии остановить бурный рост потребления горючих ископаемых или резко изменить структуру топливно-энергетического баланса в пользу более безопасных для окружающей среды источников энергии. Тем не менее вектор общественного мнения все активнее смещается в сторону низкоуглеродной концепции развития энергетики, которая опирается на идею парникового эффекта. На сегодняшний день основополагающим международным документом в этой сфере является Парижское соглашение по климату, которое в том числе подписано и правительством России. В то же время в научной среде все более активизируется тема недостаточной обоснованности гипотезы парникового эффекта и переоценки антропогенного воздействия на климат.

Угольная энергетика и коксодоменная металлургия базируются на технологических принципах более чем двухвековой давности. Объективная реальность все более настоятельно требует смены традиционного технологического уклада в использовании угля. По мнению эксперта в области мировой энергетики Вацлава Смила, «у нас не было бы причин так негативно отзываться об угле, если бы в процессе его использования мы применяли современные передовые технологии».

Одним из прорывных решений проблемы является технология частичной газификации угля «Термококс», которая отвечает на все вызовы нового времени: она обеспечивает радикальное повышение как экономической эффективности, так и экологической безопасности использования угольного топлива.

При частичной газификации из угля производится два целевых продукта — газ и углеродный остаток (термококс), которые делят между собой общие капитальные и эксплуатационные затраты производства, что приводит к решительному снижению себестоимости каждого продукта. Тепловая энергия производится за счет экологически безопасного сжигания газового топлива, а термококс, имеющий более высокую потребительскую стоимость, чем исходный уголь, направляется на рынок специальных видов топлива и металлургического сырья. Таким образом, с экономической точки зрения обеспечивается полная аналогия со схемой когенерации в энергетике, однако при существенно меньших инвестиционных затратах. Более того, продажа твердых продуктов, как правило, полностью компенсирует затраты на исходное топливо.

Экологическая уникальность технологии частичной газификации угля заключается в том, что *преобладающая часть углерода выводится из цикла энергетического производства*. При сжигании «угольного» газа эмиссия CO_2 только на 30–40 % больше соответствующего показателя для природного газа (против 80–100 % при сжигании угля). Принципиально важно, что радикальное снижение эмиссии обеспечивается не путем улавливания или химического связывания углекислого газа после сжигания топлива, а за счет снижения его генерации. Минеральная часть угля капсулируется в твердом продукте, поэтому отсутствуют золошлаковые отходы. Безусловно, углерод и зола высвобождаются на следующих этапах использования термококса. Однако в металлургии этот процесс осуществляется в рамках замещения классического кокса, который производится по технологии высшего класса экологической опасности. А эффективность угольной энергетики сверхкритических параметров может быть обеспечена только за счет высокой теплоты сгорания топлива (не менее 7 000 ккал/кг). Натуральные угли такого качества в большом дефиците. При частичной газификации угля выбросы относятся на единицу производимой тепловой энергии, поэтому второй продукт, термококс, производится с нулевыми выбросами. Перечисленные экологические показатели — беспрецедентное достижение для угольной технологии. Они переводят «самое грязное» на планете ископаемое горючее в категорию экологически безопасного и даже низкоуглеродного топлива.

Концепция «Термококс» может быть использована в качестве технологической платформы для создания черной металлургии нового поколения, в которой функции классического доменного кокса, т. е. источника энергии

и углеродистого восстановителя, будут выполнять продукты частичной газификации бурого угля. Это открывает уникальную перспективу для бурых углей Канско-Ачинского бассейна, которые из низкосортного вида топлива превращаются в стратегически важный ресурс страны.

Я выражаю глубокую признательность всем своим коллегам, с которыми в разные годы работал над созданием нового технологического направления в переработке угля. Без их помощи было бы невозможно получить многие результаты, представленные в этой книге.

С. Р. Исламов,
доктор технических наук