

На правах рукописи



КУЛЕШ МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

**АВТОТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА УГЛЕЙ МЕТОДОМ ЧАСТИЧ-
НОЙ ГАЗИФИКАЦИИ В СЛОЕ С ПУЛЬСИРУЮЩИМ ДУТЬЕМ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2016

Работа выполнена в ООО «Энерготехнологическая компания «Термококс»

Научный руководитель: Исламов Сергей Романович
доктор технических наук

Официальные оппоненты: Богомолов Александр Романович –
доктор технических наук, доцент, Федеральное
Государственное бюджетное учреждение
науки, Институт теплофизики им. С.С. Кута-
таладзе СО РАН, г. Новосибирск, лаборато-
рия проблем тепломассопереноса, ведущий
научный сотрудник

Козлов Сергей Георгиевич –
кандидат технических наук, Сибирский науч-
но-исследовательский институт ВТИ Красно-
ярского филиала АО «Сибирский энергетиче-
ский научно-технический центр», топочная
лаборатория, заведующий лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего обра-
зования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

Защита диссертации состоится 28 сентября 2016 г. в 16:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.099.07 на базе Сибирского федерального уни-
верситета по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70,
ауд. А-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского фе-
дерального университета <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 года

Учёный секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Согласно принятой Правительством РФ «Энергетической стратегии России на период до 2035 года» поставлена задача обеспечения конкурентоспособности угольной продукции с другими энергоносителями на внутреннем рынке и повышения её экспортного потенциала. В то же время увеличение потребления ископаемых углей будет сопровождаться ростом экологической нагрузки на окружающую среду, поскольку при сжигании и переработке угля образуется больше вредных побочных продуктов и парниковых газов по сравнению с нефтью и природным газом.

В мире с каждым годом возрастают требования к твердым топливам с точки зрения снижения отрицательных экологических последствий их использования. Снижение негативного воздействия угольной энергетики на окружающую среду может быть достигнуто за счёт совершенствования технологии сжигания угля и перехода к использованию экологически более безопасных видов топлива получаемых из угля. К экологически безопасным видам топлива относится бездымное топливо, а в частности полукокс, являющийся продуктом переработки угля. Полукокс используется как топливо в малых котельных, бытовых котлах, для приготовления пищи и др.

Традиционные методы энергетического и технологического использования угля, по существу, достигли своего предела экономической и экологической эффективности. В связи с этим значительный интерес представляет разработка новых способов переработки угля, которые обеспечивают качественное повышение энергоэффективности использования угля, а также высокий уровень экологической безопасности, как получаемой продукции, так и самих способов переработки.

Перспективным сырьем для переработки являются угли низкой степени метаморфизма: длиннопламенные и бурые, которые необходимо рассматривать не только как топливо для сжигания, но и как ценное технологическое сырье для переработки в продукцию с улучшенными потребительскими свойствами, что, в свою очередь, обеспечит расширение сферы их применения.

Особое внимание в сфере облагораживания уделяется бурым углям. Эффективность их использования определяется тем, что они в основном добываются открытым, наиболее дешевым способом.

Цель работы заключается в разработке научно обоснованного технологического процесса термической переработки углей низкой степени метаморфизма для получения топлива с повышенными потребительскими свойствами в части теплотехнических, экологических и прочностных характеристик.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Выполнить критический анализ технологий термической переработки угля для оценки перспективности их промышленного применения и на основе полученных результатов определить направление исследований.

2. Выполнить экспериментальное исследование процесса термообработки одиночных частиц угля для определения основных управляющих параметров, изучить влияние этих параметров на теплотехнические и прочностные характеристики получаемого полукокса.

3. Опираясь на результаты исследований, полученных на одиночных частицах угля, обосновать выбор конструкции установки для нового процесса производства полукокса. На данной установке выполнить экспериментальные исследования по переработке углей.

4. Разработать технологический процесс термической переработки углей низкой степени метаморфизма и оценить эффективность его применения в промышленном масштабе.

Объектом исследования является технологический процесс термической переработки углей низкой степени метаморфизма.

Объектом исследования является технологический процесс термической переработки углей низкой степени метаморфизма.

Предмет исследования – взаимосвязь тепловых процессов переработки углей с характеристиками конечных продуктов.

Методы исследований: натурный эксперимент, включающий измерение характеристик по стандартизированным методикам, статистическую обработку полученных результатов и др.; метод аналогий и сравнения; метод анализа и обобщения.

Научная новизна работы, заключается в следующем:

1. Экспериментально установлен характер взаимосвязи темпа нагрева и прочности отдельных частиц бурого и длиннопламенного (каменного) углей в процессе их термообработки, что позволило определить режимы нагрева куска угля для достижения высокой прочности полукокса.

2. Установлено, что в процессе частичной газификации в слоевом реакторе с обращенным дутьем снижение скорости нагрева кускового угля обеспечивается применением пульсирующего режима дутья.

3. Разработан новый технологический процесс автотермической переработки углей с высоким содержанием летучих веществ в высококалорийное твердое топливо, отличающийся возможностью применения слоевых аппаратов с пульсирующим обращенным воздушным дутьем. Подана заявка на изобретение (заявка на пат. 2015143182 от 09.10.2015).

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального исследования процесса термообработки одиночных частиц бурого и длиннопламенного (каменного) углей во взаимосвязи с прочностными характеристиками получаемого полукокса, которые показывают, что при изменении температуры греющей среды со скоростью не более 0,056 град/с обеспечивается прочность полукокса на раздавливание не менее 8 МПа.

2. Результаты исследования процесса частичной газификации углей в слоевом реакторе с пульсирующим обращенным воздушным дутьём, которые позволили определить количественные значения управляющих параметров для

получения высококалорийного твердого топлива из исследуемых углей, а именно: расход воздуха, время подачи дутья, время останова дутья.

3. Новый технологический процесс производства кускового полукокса из углей низкой степени метаморфизма, отличающийся возможностью применения слоевых аппаратов с пульсирующим обращенным воздушным дутьем.

Практическая значимость. Новые экспериментальные исследования позволили: определить технологические режимы переработки ряда углей (марки Б и Д) в слоевом газификаторе с пульсирующим обращенным воздушным дутьем, обеспечивающим экономию энергетических ресурсов и улучшение качества продукции; разработать новый технологический процесс автотермической переработки углей с высоким содержанием летучих веществ в кусковое высококалорийное топливо (полукокс) с возможностью комбинированного производства энергоносителей, обладающий улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками; разработать технологический регламент производства полукокса из углей низкой стадии метаморфизма и практические рекомендации по проектированию такого производства.

Реализация результатов работы. Прикладные результаты диссертационной работы (технологический регламент производства, рекомендации по проектированию углеперерабатывающего производства, экономические расчеты и др.) приняты компанией ООО «Сибуголь» (г. Красноярск), проектным институтом СибНИИУглеобогащение (АО «СУЭК»), ООО «СУЭК-Хакасия» (г. Черногорск) для использования при проектировании углеперерабатывающих предприятий, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных средств и аттестованных методик проведения исследований; применением современного, откалиброванного и поверенного регистрирующего и испытательного оборудования, позволяющего с высокой точностью осуществлять измерения требуемых параметров; удовлетворительной сходимостью экспериментальных результатов при повторном воспроизведении в одних и тех же условиях; непротиворечивостью исследованиям других авторов.

Апробация результатов диссертационных исследований. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной заочной научно-практической конференции «Наука, образование, общество: актуальные вопросы и перспективы развития» (2015), IX всероссийской конференции «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (г. Новосибирск, 2015), на научном семинаре научно-исследовательского отдела ООО «ЭТК Термококс» (2016).

Публикации по теме диссертационных исследований.

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, в том числе 3 в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций, из них 2 статьи переведены на английский язык и опубликованы в журналах индексируемые Scopus, Web of science, Thomson Reuters, 2 доклада в сборниках международных и российских конференций индексируемые РИНЦ.

Личный вклад автора состоит в подготовке и модернизации экспериментальных установок, разработке методик исследования, постановке, подготовке и проведении экспериментов, получении и обработке экспериментальных данных на всех этапах работы, в апробации результатов работы, разработке практических рекомендаций по реализации данного технологического процесса в промышленном масштабе, подготовке текстов статей для публикации в научных журналах и сборниках конференций. Общая научная идея, направления и задачи исследований были сформулированы при участии научного руководителя.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников (103 наименования) и приложений общим объемом 162 страницы машинописного текста и содержит 53 рисунка, 43 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи, определены объект и предмет исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость результатов, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится критический обзор существующих технологий карбонизации угля низкой степени метаморфизма, рассматриваются теоретические аспекты процесса карбонизации угля.

В настоящее время востребованным направлением прикладных исследований является разработка технологий по производству высококалорийного твёрдого топлива из углей низкой степени метаморфизма без применения стадии брикетирования.

На сегодняшний день в мире насчитываются десятки технологий производства полукокса из углей низкой степени метаморфизма. Большая часть из них подходит для переработки угля низкого класса крупности, и только некоторые нацелены на переработку крупнокускового угля. По результатам обзора существующих мировых технологий были выделены следующие: GEO-COAL, LiMaxTM, печи SJ, Термококк-С. К преимуществам данных технологий необходимо отнести: по технологии GEO-COAL возможно получение продукта трех видов (GEO-LITE, GEO-HIGH, GEO-MET); особенностями технология LiMaxTM являются низкие капитальные и эксплуатационные затраты; печи типа SJ выделяются высокой производительностью; технологию Термококк-С отличают низкие капитальные и эксплуатационные затраты, высокая экологичность и простота обслуживания. Однако, ни одна из рассмотренных технологий не сочетает в себе простоту исполнения, экономическую эффективность, высокую производительность, малые капитальные вложения и эксплуатационные затраты, экологическую безопасность.

На основании проведенного анализа технологий карбонизации угля сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям на одиночных частицах угля. Приводится описание экспериментальной установки, теплотехнические характеристики испытуемых углей, методики проведения экспериментов и обработки результатов.

Методическая структура экспериментального исследования на одиночных частицах угля включает:

- подготовку образцов;
- определение теплотехнических и прочностных характеристик исходного угля;
- проведение экспериментов по выявлению основных управляющих параметров и их влияния на теплотехнические характеристики получаемого карбонизата;
- определение теплотехнических характеристик и испытание на прочность получаемого карбонизата.

Исходя из цели и сформулированных задач, для экспериментального исследования были выбраны следующие угли низкой степени метаморфизма: ЗБ (разрез Большесырский, Красноярский край, ООО «Сибуголь»), Д (разрез Моховский, Кемеровская область, ОАО «Угольная компания Кузбассразреуголь»), Д (разрез Караканский, Кемеровская область, ООО «Каракан-Инвест»). В первую очередь исследования проводились на угле ЗБ и далее воспроизводились на других углях. Теплотехнические характеристики исследуемых углей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Теплотехнические характеристики исследуемых углей

Угли	W^r , %	A^d , %	V^{daf} , %	Прочность, МПа	Низшая теплота сгорания, МДж/кг
2Б (березовский)	30,4	4,9	48,5	14,8	15,7
ЗБ (большесырский)	20,1	4,5	45,9	16,6	21,1
Д (моховский)	17,9	6,6	42,3	28,9	21,8
Д (караканский)	15,1	9,0	42,5	28,3	23,0

С целью приведения исследуемых частиц угля к единообразной форме в качестве одиночных образцов использовались образцы кубической формы со стороной 20 мм, которые вырезались из монолитных кусков угля. В каждом эксперименте использовалось 7-10 образцов угля.

Исследование влияния управляющих параметров на процесс карбонизации одиночных частиц угля проводилось на экспериментальной установке (рисунки 1), позволяющей определять изменение массы образцов в течение процесса термообработки.

Теплотехнические характеристики исходного угля и продуктов карбонизации определялись согласно ГОСТ Р 52917-2008, ГОСТ Р 52911-2013,

ГОСТ Р 55660-2013, ГОСТ Р 55661-2013. В ключевых экспериментах анализы выполнялись в аккредитованной испытательной лаборатории АО «Сибирский ЭНТЦ». Определение прочностных характеристик угля и полукокса проводилось по ГОСТ 21289-75.

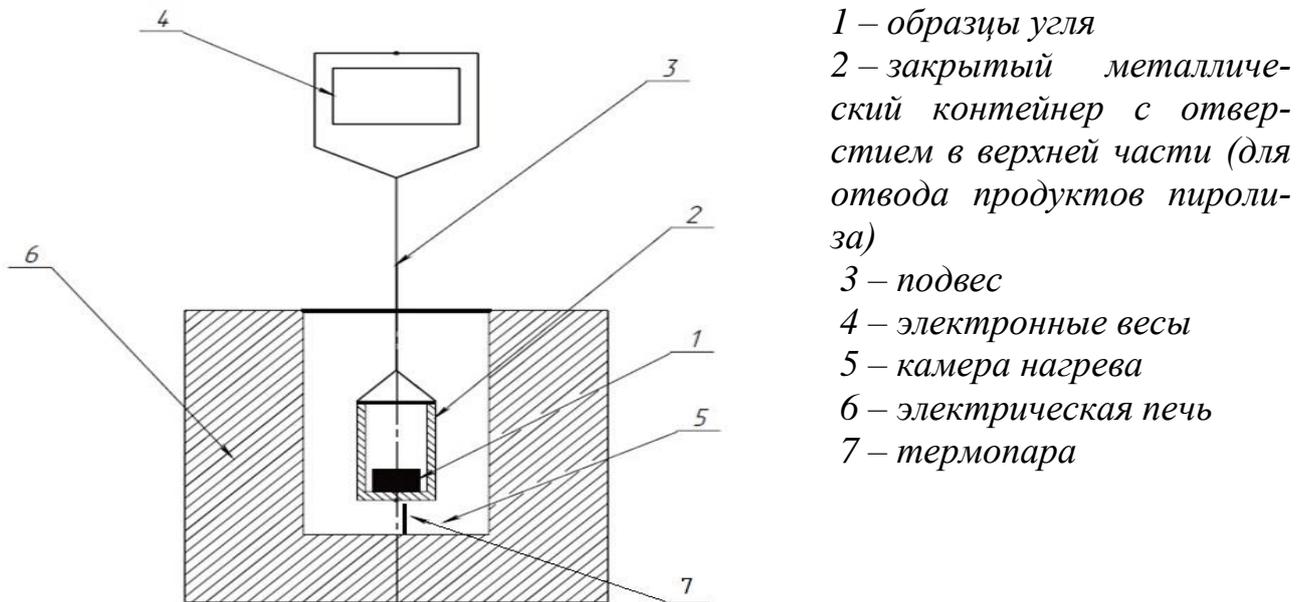


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследования процесса термической обработки одиночных частиц угля

Первым этапом поисковых экспериментов было определение температуры греющей среды, при которой влага (а также незначительная часть летучих веществ) выходит из угля с сохранением наибольшей прочности образцов после термообработки. Для исследования процесса сушки угля были выбраны четыре температурных уровня: 250°C, 300°C, 350°C, 400°C. Продолжительность выдержки при постоянной температуре составляла 60 минут. При этом каждые 10 минут посредством весов с подвесной системой фиксировалась масса образцов.

На каждом температурном уровне производилась термообработка семи образцов для последующего усреднения измеряемых показателей. У всех обработанных образцов после охлаждения измерялась прочность на раздавливание по ГОСТ 21289-75. На рисунке 2 представлены относительные значения прочности образцов в зависимости от температуры обработки.



Рисунок 2 – Относительные значения прочности образцов в зависимости от температуры обработки

Из рисунка видно, что наибольшая прочность сохраняется при температуре обработки 250°C, а также не значительно отличается прочность при температуре обработки 300°C. При температуре греющей среды 350°C и 400°C средняя прочность значительно уменьшается.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что наиболее приемлемыми, с точки зрения сохранения прочности, температурными

уровнями являются 250°C и 300°C. Однако при почти одинаковой прочности испытанных образцов, температура 300°C является более предпочтительной с точки зрения затрат времени на переработку угля. Также в дальнейших экспериментах время стадии сушки при постоянной температуре было решено ограничить 10-ю минутами, поскольку за это время удаляется большая часть влаги из образцов.

При исследовании процесса карбонизации одиночных образцов помимо угля марки ЗБ, также был использован уголь марки Д (разрез Моховский). Моховский уголь, как и большесырский, относится к молодым маркам угля и его выбор обусловлен возможностью проверки и воспроизведения результатов, полученных на буром угле.

В результате серии выполненных экспериментов была определена предельная температура стадии термообработки высушенного угля, а также предельно допустимый по условию сохранения прочности темп нагрева. Требуемое качество продукта по остаточному содержанию летучих и прочности обеспечивается при линейном изменении температуры печи 300–600°C в течение 3-х часов, то есть при темпе нагрева 0,028 град/с. Далее этот режим термообработки считается *базовым режимом*.

Для контроля изменения прочности образцы отбирались через каждые 30 минут после начала стадии термообработки при достижении 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C. График зависимости прочности полукокса из угля ЗБ от температуры и времени выдержки представлен на рисунке 3а, аналогичный график для полукокса из угля марки Д представлен на рисунке 3б. Из этих графиков следует, что значительная часть прочности теряется в процессе удаления летучих веществ – она снижается примерно в 2 раза по сравнению с

прочностью исходного угля. В конечном итоге прочность на раздавливание у прокаленных образцов достигает уровня 8 МПа.

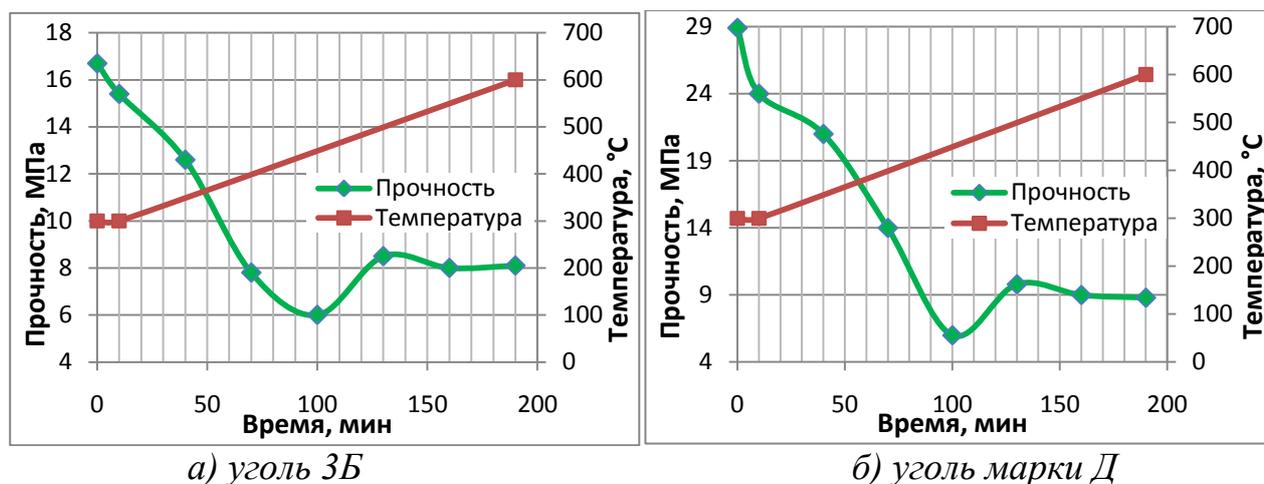


Рисунок 3 – Зависимость прочности полукокса от температуры и времени выдержки

Необходимо отметить, что в области температур 400–500°C наблюдается снижение прочности, а далее происходит её увеличение примерно на 30%. Этот эффект «восстановление прочности» наблюдался при исследовании образцов из обеих марок углей. Его достоверность была подвергнута тщательной проверке путем многократного повторения опытов, однако ошибок эксперимента обнаружено не было. Если сопоставить график зависимости прочности от температуры и времени с графиком изменения содержания летучих веществ (рисунок 4), то можно предположить, что упрочнение происходит за счет коксования части высокомолекулярной органики (смол), образующейся на заключительной стадии пиролиза органической части угля.

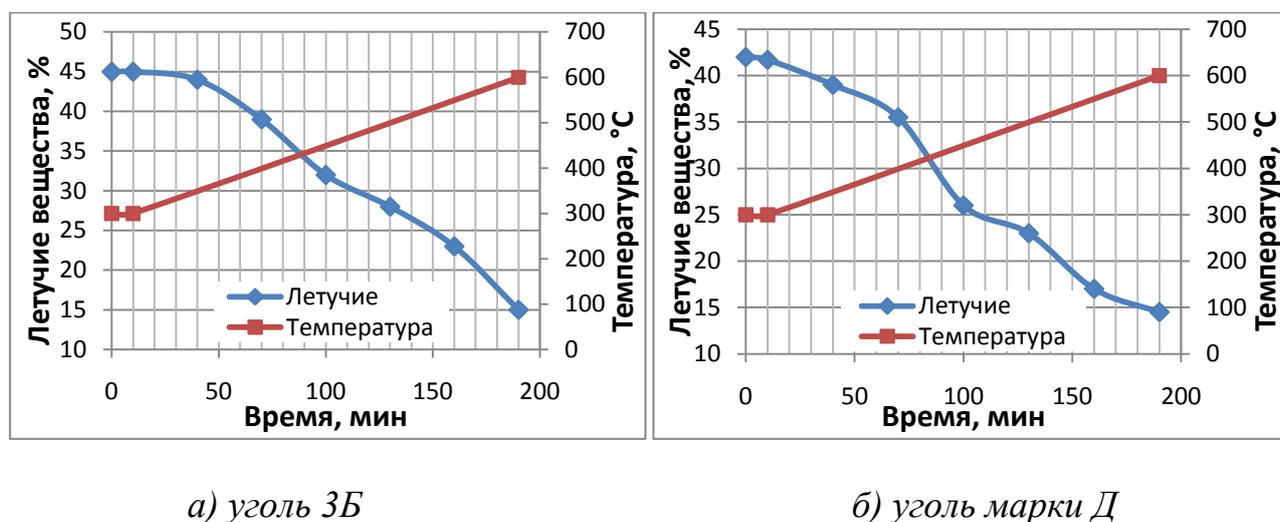


Рисунок 4 – Динамика удаления летучих веществ при карбонизации углей

В таблице 2 представлены характеристики конечного продукта, полученного по базовому режиму термообработки, в сравнении с характеристиками исходного угля.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики исходного угля и полукокса, полученного при термообработке по базовому режиму

	Исходный уголь ЗБ	Полукокс угля ЗБ	Исходный уголь Д	Полукокс угля Д
W^r , %	20,1	0	17,9	0
A^d , %	4,5	7,0	7,2	9,1
V^{daf} , %	45,9	15,4	42,3	14,6
Низшая теплота сгорания (рабочее состояние), МДж/кг (ккал/кг)	21,0 (5000)	30,3 (7240)	21,8 (5220)	29,5 (7060)
Сера, %	0,33	0,41	0,35	0,18
Прочность, МПа	16,6	8,2	28,8	8,9

Один из самых важных результатов – это значительное увеличение теплоты сгорания карбонизата. Для полукокса, полученного из угля ЗБ, она составила 30,3 МДж/кг (7240 ккал/кг), а для полукокса из длиннопламенного угля – 29,5 МДж/кг (7060 ккал/кг), что соответственно на 44% и 35% выше, чем у исходного угля. Необходимо также отметить, что в процессе карбонизации угля производится второй ценный продукт – горючий газ, который также рекомендуется использоваться в качестве топлива.

Была исследована возможность ускорения процесса карбонизации. При этом параметры стадии сушки оставались неизменными. Сохранялся неизменным температурный интервал стадии карбонизации (от 300 до 600°C) и линейный характер роста температуры. Дополнительно были протестированы два режима: соответственно с темпом нагрева 0,056 и 0,11 град/с (продолжительность нагрева 90 и 45 минут соответственно). В обоих случаях характеристики конечного продукта по теплоте сгорания и выходу летучих веществ остались примерно на том же уровне, что и при использовании основного режима термообработки. Однако прочность полукокса из угля марки ЗБ понизилась на 15–20% и на 30–35% соответственно (данные относительно базового режима). Прочность полукокса из угля марки Д для режима с темпом нагрева 0,056 град/с – осталась примерно на том же уровне, а для режима 0,11 град/с – уменьшилась на 20% (данные относительно базового режима).

Воспроизведение режимов сушки и карбонизации, определенных ранее для угля ЗБ на 2Б (разрез Березовский) показало отрицательный результат. На данном угле в процессе экспериментов вообще не удалось добиться удовлетворительной прочности.

В результате воспроизведения режимов термообработки на угле марки Д (разрез Караканский) не удалось получить объективные данные о прочности на раздавливание, поскольку уголь обладает способностью к вспучиванию. Однако, даже несмотря на изменение формы, были проведены испытания по определению прочности образцов и результаты показали, что полукокк обладает достаточно высокой прочностью, что повлияло на решение о его использовании в дальнейшем исследовании.

По результатам проведенных экспериментов, сделаны следующие выводы:

1. Необходимая температура греющей среды для стадии сушки, с точки зрения обеспечения приемлемой для практики прочности, равна 300°C . Данное утверждение справедливо для углей ЗБ (разрез Большесырский), Д (разрез Моховский).

2. Определены основные управляющие параметры процесса карбонизации: скорость нагрева и максимальная температура греющей среды. Приемлемая для практики прочность производимого полукокка обеспечивается при изменении температуры греющей среды от 300 до 600°C со скоростью не более $0,056$ град/с. Данное утверждение справедливо для углей ЗБ (разрез Большесырский), Д (разрез Моховский).

3. Определена динамика изменения прочности образцов угля в границах температурного диапазона $300\text{--}600^{\circ}\text{C}$.

4. Впервые обнаружен эффект «восстановления прочности» в области температур $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$, можно предположить, что упрочнение происходит за счет коксования части высокомолекулярной органики (смола), образующейся на заключительной стадии пиролиза органической части угля.

В третьей главе выполнено обоснование выбора аппаратного оформления производственного процесса, а также приведены результаты исследования параметров карбонизации угля в выбранном аппарате.

Классическая схема аллотермической переработки кускового угля с подводом тепла через стенку имеет ряд недостатков, среди которых на первом месте – низкая энергоэффективность и длительность технологического процесса, неоднородность качества продукции, попутное производство пиролизного газа, забалластированного смолами. Ситуация радикальным образом изменяется при использовании автотермической технологии частичной газификации кускового угля в аппаратах шахтного типа с обращенным воздушным дутьем, которая обеспечивает равномерный по сечению аппарата нагрев угля за счет сжигания на поверхности куска выделяющегося из него пиролизного газа и паров смолы. Такой аппарат и был выбран в качестве перерабатывающей установки. На рисунке 5 приведена принципиальная схема экспериментальной установки.

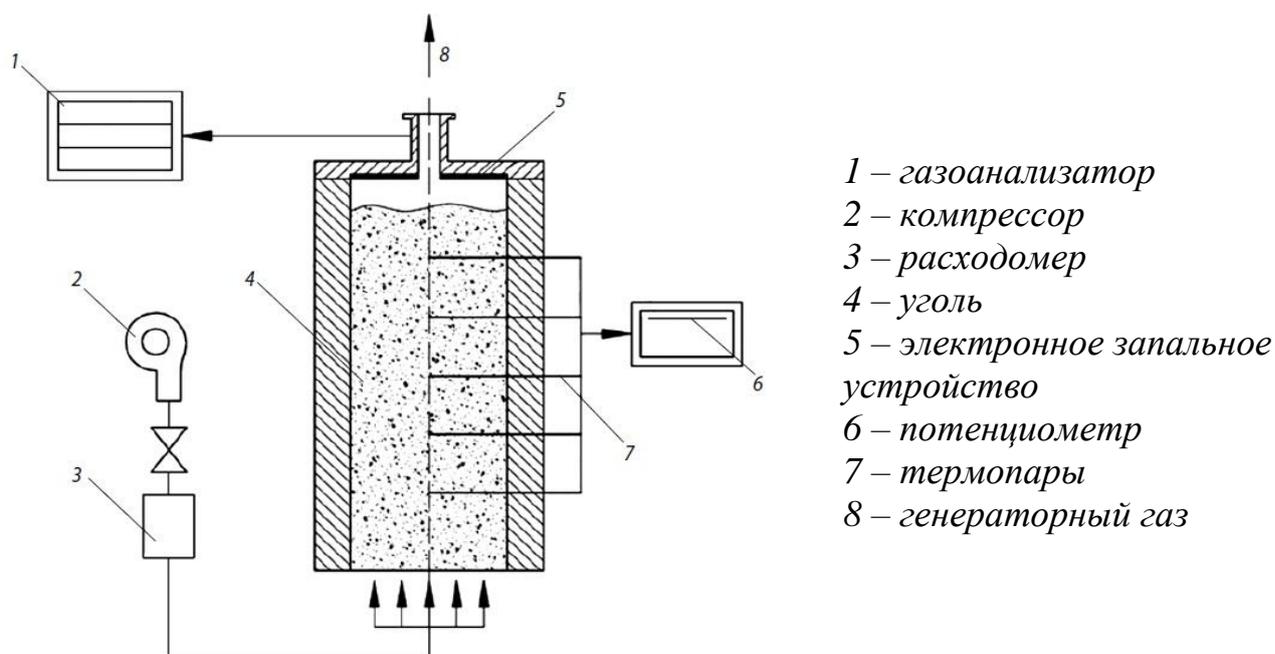


Рисунок 5 – Принципиальная схема экспериментальной установки для слоевой газификации угля с обращенным дутьем

В качестве сырья использовали уголь марки ЗБ (разрез Большесырский, Красноярский край, ООО «Сибуголь»). Непосредственно перед экспериментом уголь подвергали дроблению и разделению на классы крупности.

В результате серии экспериментов было установлено, что даже при минимальном расходе воздуха, который еще в состоянии обеспечить нижний предел существования тепловой волны в слое (т.е. процесса горения), скорость нагрева угольных частиц неприемлемо высока.

Были проведены поисковые исследования с углем класса крупности 15–40 мм. Основная цель заключалась в обеспечении умеренной скорости нагрева частиц в пределах от 0,028 до 0,056 град/с. Поскольку прогрев термически массивных частиц угля является внутренней тепловой задачей, скорость их нагрева зависит только от одного параметра – температуры поверхности. В свою очередь, она определяется единственным управляющим параметром – расходом воздуха в реактор.

Так, при уменьшении расхода воздуха ниже 0,0108–0,0111 м³/(м²·с) тепловыделение в зоне физико-химических превращений уже не позволяет компенсировать тепловые потери и процесс газификации затухает. При расходе воздуха 0,0111 м³/(м²·с) был получен полукок с низшей теплотой сгорания 27,2–29,3 МДж/кг (6500–7000 ккал/кг) и содержанием летучих веществ $V^{daf} \approx 16\%$. Однако его прочность оказалась существенно ниже того максимума, который был достигнут в экспериментах с одиночными частицами, что обусловлено высокой скоростью нагрева. В этом случае скорость перемещения тепловой волны по угольной засыпке составляла 0,066–0,078 м/ч.

Для того чтобы снизить скорость движения тепловой волны и тем самым обеспечить более замедленный прогрев угольных частиц, было принято решение перейти в область пульсирующих режимов с дискретной подачей воздуха. Здесь имеется в виду чередование периодов подачи окислителя и его отключения с продолжительностью от 0 до 10 минут. В этом случае снижается среднеинтегральная подача воздуха в зону реагирования и, соответственно, интенсивность тепловыделения, а также уменьшается скорость движения тепловой волны по угольной засыпке.

В период отсутствия воздуха угольные частицы продолжают выделять влагу и летучие вещества, но их температура снижается. В период поступления воздуха летучие вещества воспламеняются, и продукты горения разогревают частицы угля.

Пульсирующий режим обеспечивался прерыванием потока воздуха с помощью временного реле, установленного в электрическую цепь компрессора. В этом варианте исполнения технологии газификации угля, помимо расхода воздуха, к регулирующим параметрам добавились период подачи и период остановки дутья. Пример типичной термограммы режима газификации с пульсирующим дутьем, полученной при исследовании процесса частичной газификации угля, приведен на рисунке 6.

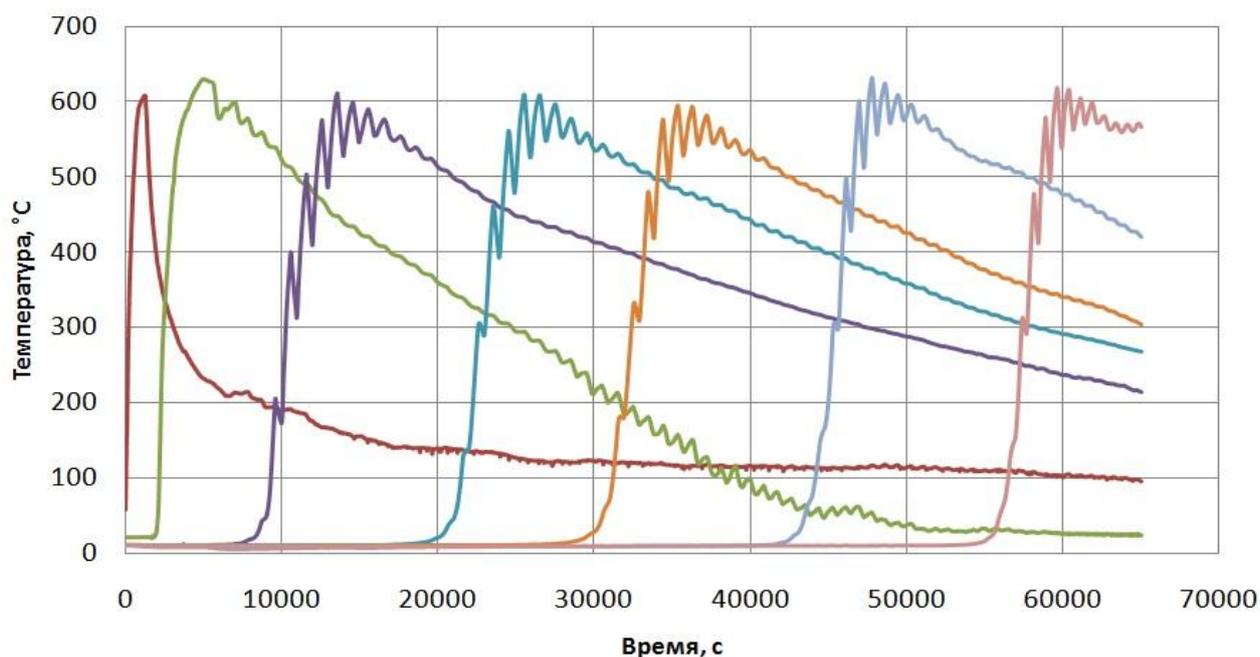


Рисунок 6 – Пример полученной типичной термограммы режима газификации с пульсирующим дутьем

Область изменения параметров в экспериментах была определена на основании ранее полученных данных при исследовании процесса термообработки одиночных частиц. В качестве предельно допустимой температуры нагрева

частиц было принято значение $600 \pm 30^\circ\text{C}$. Расход воздушного дутья, а также продолжительность периодов подачи и останова дутья определяли эмпирически, исходя из условия, что нагрев угольных частиц от 300°C до предельной температуры должен осуществляться с темпом нагрева $0,028\text{--}0,056$ град/с.

В результате серии экспериментов с целью достижения высокой прочности твердого продукта были определены следующие параметры пульсирующего дутья: расход воздуха $0,022 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; продолжительность периода дутья 25 с; период останова дутья 150 с. При этом скорость тепловой волны снизилась более чем в два раза по сравнению с нижним пределом существования стационарного режима газификации и составила $0,027\text{--}0,033$ м/ч (согласно проведенным исследованиям). Полученный при этих параметрах бурого угольный полукокс имел прочность на раздавливание в пределах 8–10 МПа, что соотносится с показателем, полученным на одиночных частицах. Выход продукта составил 56%.

Для угля марки Д разреза Моховский определены следующие параметры: расход воздуха $0,026 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; продолжительность периода дутья 35 с; период останова дутья 135 с. При этом прочность составляла 8–10 МПа, а выход продукта 58%.

Уголь марки Д разреза Караканский отличается от аналогичного по марке угля Д разреза Моховский. Данный уголь обладает способностью к вспучиванию при сохранении относительно высоких прочностных характеристик. Это свойство угля позволило получить высококалорийный полукокс с высокими прочностными характеристиками и с низким содержанием остаточных летучих веществ без применения пульсирующей подачи воздуха, т.е. при более высокой скорости нагрева. Результат был достигнут при расходе воздуха $0,0108\text{--}0,0111 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. В таблице 3 представлены теплотехнические характеристики углей после термообработки в слоевом газификаторе.

Таблица 3 – Теплотехнические характеристики полукокса, полученного в слоевом газификаторе

Угли	W^r , %	A^d , %	V^{daf} , %	Прочность, МПа	Низшая теплота сгорания, МДж/кг
ЗБ (большесырский)	3,5	6,8	14,8	8–10	29,3
Д (моховский)	2,9	8,6	14,2	8–10	28,3
Д (караканский)	4,2	11,2	15,3	12–16	28,8

Таким образом, в результате серии экспериментов на слоевом аппарате:

1. На основе результатов исследований, полученных на одиночных частицах угля, обоснована конструкция установки для нового процесса производства полукокса.

2. На данной установке экспериментально определены основные технологические параметры процесса карбонизации угля: расход воздуха, продолжительность периода подачи и останова дутья, которые обеспечивают приемлемую для практики прочность полукокса.

В четвертой главе изложены рекомендации к проектированию углеперерабатывающего предприятия мощностью 50 тыс. т бездымного топлива в год: предложены варианты конструкторского исполнения слоевых аппаратов повышенной производительности, схема линии переработки, выполнен технико-экономический расчет.

На рисунке 7 представлена принципиальная схема предприятия по производству высококалорийного бездымного топлива. Предварительно классифицированный уголь завозится полувагоном **1** в цех производства полукокса и разгружается из него грейферным ковшом **2** в приёмную ёмкость угля **3**. Затем из приемной емкости уголь по мере необходимости загружается грейферным ковшом **2** в загрузочные бункеры **4**. Для загрузки газификаторов грейферный ковш отсоединяется и подъемным краном **5** бункеры выгружаются в газификатор **6**. По завершении в газификаторе процесса карбонизации и охлаждения полученный полукокс по цепочке транспортеров **7, 8, 9** поступает на грохот **10**, где рассеивается на классы крупности 0–10 мм и 10–40 мм. Класс крупности 10–40 мм транспортером **11** и плужковыми сбрасывателями **12** загружается в приемные бункеры **13**. Класс крупности полукокса 0–10 мм ссыпается с грохота в приемный бункер **14**. Из приемных бункеров **13,14** полукокс по мере необходимости ленточным транспортером **15** загружается в автотранспорт и вывозится потребителю. Горючий газ, получаемый в процессе переработки угля, подается на котельную и сжигается.

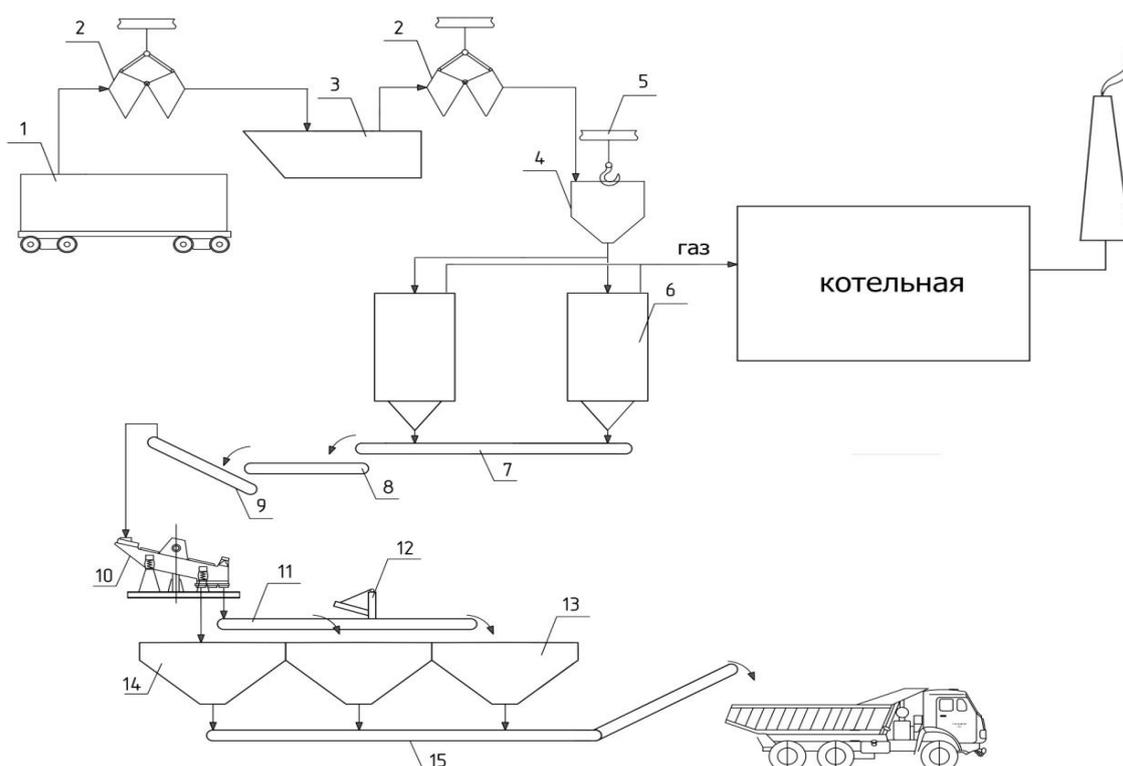


Рисунок 7 – Принципиальная схема перерабатывающего предприятия

На основании исходных данных (материальный и тепловой балансы, параметры процесса и пр.) выполнена технико-экономическая оценка организации производства 50 тыс. т в год бездымного топлива из угля 3Б (разрез Большесырский, Красноярский край, ООО «Сибуголь»). Капитальные инвестиции в проект составляют 365 млн. руб. Производство высококалорийного твердого топлива ориентировано на экспорт в КНР.

Основные технические показатели предприятия представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные показатели производства и реализация продукции

Показатели	Единица измерения	Значение
Потребление угля 3Б	тыс. т/год	90
Производство полукокса	тыс. т/год	50
Генерация тепловой энергии (горячая вода)	тыс. ГДж/год	100
Продолжительность строительства, включая ПКР	год	2
Объем инвестиций	млн. руб.	365
Дисконтированный срок окупаемости с начала эксплуатации	год	2,2

Проведен расчет показателей экономической эффективности на период 10 лет. При цене бездымного топлива 7500 руб./т срок дисконтированный срок окупаемости проекта с начала эксплуатации составляет немногим более двух лет.

Оптовая цена бездымного топлива, представленного в настоящее время на мировом рынке, составляет от 220 до 600\$/т. Учитывая себестоимость производства бездымного топлива по данному процессу (2000–2600 руб./т), а также дефицитность и постоянно растущий спрос, эффективность разработанного технологического процесса очевидна.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Сформулированы основные результаты работы и выводы.

1. На основании анализа современных технологий переработки угля, направленных на получение высококалорийного твердого топлива, определена перспективность термической переработки углей с высоким содержанием летучих веществ с возможностью комбинированного производства энергоносителей исключая стадию брикетирования конечного продукта и обеспечивающей экологическую безопасность производства.

2. В результате экспериментальных исследований процесса нагрева одиночных частиц бурого и длиннопламенного (каменного) углей установлены и количественно определены основные управляющие параметры процесса карбонизации (скорость нагрева, максимальная температура греющей среды), изучено их влияние на показатели процесса карбонизации и прочностные характеристики получаемого полукокса. Показано, что достаточно прочный полукокс (прочность по ГОСТ 21289-75 не менее 8 МПа) получается при соблюдении скорости нагрева не более 0,056 град/с.

3. Впервые обнаружен эффект «восстановления прочности» в области температур 400–500°C. Предположительно, упрочнение происходит за счет коксования части высокомолекулярной органики (смол), образующейся на заключительной стадии пиролиза органической части угля.

4. На основе результатов исследований, полученных на одиночных частицах угля, обоснована конструкция установки для нового процесса производства полукокса. На данной установке экспериментально определены основные технологические параметры процесса карбонизации угля: расход воздуха, продолжительность периода подачи и останова дутья, которые обеспечивают приемлемую для практики прочность полукокса.

5. Разработан новый технологический процесс переработки бурого и длиннопламенного (каменного) углей в высококалорийный полукокс на основе частичной газификации в слое с пульсирующим обращенным дутьем.

6. Разработаны технологическая схема и технологический регламент производства, реализующие процесс автотермической переработки углей низкой степени метаморфизма в слоевом аппарате с получением высококалорийного

бездымного топлива. Технологический регламент производства принят для использования при проектировании углеперерабатывающих предприятий: компанией ООО «Сибуголь» (г. Красноярск), проектным институтом СибНИИУглеобогащение (АО «СУЭК»), ООО «СУЭК-Хакасия» (г. Черногорск).

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Кулеш, М.В.** Исследование возможности производства из углей марки 3Б и Д высококалорийного топлива с низким содержанием летучих / М. В. Кулеш, С. Р. Исламов // Кокс и химия. – 2012. – № 8. – С. 12-14.

2. **Кулеш, М.В.** Исследование возможности производства из углей марки 3Б высококалорийного кускового топлива в слоевом газификаторе с обращенным дутьем / М. В. Кулеш, С. Р. Исламов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 10(17). – С. 54-55.

3. Исламов, С. Р. Частичная газификация бурого угля в слое с пульсирующим обращенным дутьем / С. Р. Исламов, **М. В. Кулеш** // Кокс и химия. – 2015. – № 5. – С. 2-5.

Статьи, переведенные на английский язык и индексируемые Scopus, Web of Science, Thomson Reuters:

1. **Kulesh, M.V.** Production of high-energy fuel with low volatile content from 3B and D coal / **M. V. Kulesh, S. R. Islamov** // Coke and Chemistry. – 2012. – Vol. 55. – Issue 8. – P. 297-299.

2. Islamov S.R. Partial gasification of lignite in a bed with a pulsed reverse blast / S. R. Islamov, **M.V. Kulesh** // Coke and Chemistry. – 2015. – Vol. 58. – Issue 5. – P. 153-155.

В сборниках трудов конференций:

1. **Кулеш М.В.** Краткий обзор современных зарубежных технологий переработки угля / М. В. Кулеш // сб. науч. трудов Международной заочной научно-практической конференции «Наука, образование, общество: актуальные вопросы и перспективы развития». – 2015. – С. 72-73.

2. **Кулеш М.В.**, Исламов, С.Р. Карбонизация угля в слое с пульсирующим обращенным дутьем / М. В. Кулеш, С. Р. Исламов // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: сб. науч. трудов IX Всероссийской конференции с международным участием. – Новосибирск: ИТ им. Кутателадзе, 2015. – С. 123-126.

Подписано в печать 28.06.2016. Печать плоская. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ 1234

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел./факс: (391) 206-26-49; тел. (391) 206-26-67
E-mail: print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>