

*На правах рукописи*



ГРИГОРЬЕВ Константин Анатольевич

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ,  
ПОВЫШАЮЩИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО  
ВИХРЕВОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Специальность 05.14.14 – Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена на кафедре "Реакторо- и парогенераторостроение" в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный консультант – заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор техн. наук, профессор *Рундыгин Юрий Александрович*

Официальные оппоненты:

– доктор техн. наук, профессор *Сапожников Сергей Захарович*  
– доктор техн. наук, ст. науч. сотр. *Зейгарник Юрий Альбертович*  
– доктор техн. наук, ст. науч. сотр. *Тумановский Анатолий Григорьевич*

Ведущая организация – *ОАО "Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова" (ОАО "НПО ЦКТИ"), Санкт-Петербург*

Защита диссертации состоится 26 апреля 2011 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29,  
в аудитории 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан "24" марта 2011 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812)552-6552

E-mail: kg1210@mail.ru

И. о. ученого секретаря  
диссертационного совета



*В.Ю. Митяков*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. предусматривает приоритетное развитие и внедрение в отечественной энергетике новых высокоэффективных, экологически чистых технологий сжигания твердого топлива.

К одной из перспективных технологий сжигания твердого топлива относится низкотемпературная вихревая (НТВ). Концепцию НТВ-сжигания предложил на рубеже 70-х годов прошлого века профессор В.В. Померанцев. Отличительная особенность НТВ-технологии – принцип факельного сжигания грубоизмельченного топлива в условиях многократной циркуляции частиц в зоне активного горения. Технология прошла широкую апробацию и доказала свои главные преимущества: стабильное воспламенение низкосортных топлив, отсутствие шлакования поверхностей нагрева и низкий уровень вредных выбросов.

Большой вклад в теорию и практику НТВ-сжигания внесли ученики В.В. Померанцева – Ю.А. Рундыгин, Д.Б. Ахмедов, С.М. Шестаков, Б.В. Усик, Л.Т. Дульнева, В.Е. Скудицкий, Г.В. Альфимов, В.Ю. Захаров, Ф.З. Финкер и др. Их исследования позволили накопить значительный материал по НТВ-сжиганию и подтвердить эффективность технологии.

Однако на первых этапах освоения НТВ-сжигания наряду с положительными результатами были отмечены и недостатки: повышенный механический недожог топлива, эрозионный износ поверхностей нагрева, недостаточный перегрев пара. Отсутствовали методики для расчета пылеприготовительных систем (ППС) с угрубленным помолом топлива. Это затрудняло выбор и обоснование технических решений при реконструкции действующих и создании новых котельных установок и сдерживало широкое внедрение НТВ-технологии.

Работа выполнена в рамках отраслевой программы Минэнерго СССР, межвузовской программы "Повышение надежности, экономичности и экологичности энергетической системы РФ", ведомственной научной программы Рособразования "Развитие научного потенциала высшей школы".

**Цель работы** заключается в повышении эффективности низкотемпературного вихревого сжигания твердых топлив при модернизации действующих и создании новых котельных установок.

**Поставлены и решены следующие основные задачи:**

– на основе анализа процессов и опыта работы вихревых котлов установлены причины и взаимосвязи проблем НТВ-сжигания;

– на основе теоретических и экспериментальных исследований разработана и апробирована методика расчета размольной производительности ППС с быстроходными мельницами при бесепараторном помоле;

– на основе математического моделирования разработана и апробирована методика расчета сушки в ППС с быстроходными мельницами при бесепараторном помоле;

– разработаны и апробированы на действующем оборудовании новые технологические схемы и конструкции горелочно-сопловых устройств НТВ-топок, которые позволили повысить эффективность вихревого сжигания торфа, высоковлажных, высокозольных, низкорекреационных бурых углей, каменных углей и природного газа.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

– впервые на основе понятия кратности измельчения топлива экспериментально подтвержден закон Риттингера применительно к мельницам; разработан и апробирован новый методологический подход к исследованию и расчету, установлены закономерности измельчения топлива в мельницах, разработана и апробирована методика расчета размольной производительности ППС с быстроходными мельницами при бесепараторном помоле;

– предложена и апробирована математическая модель сушки полидисперсного материала в ППС с быстроходными мельницами;

– получены новые экспериментальные данные о работе ППС прямого вдувания с быстроходными мельницами при угрубленном помоле бурых углей, при различных режимах и составе сушильного агента, а также новые данные о работе НТВ-топок полукрытого типа при вихревом сжигании торфа, бурых и каменных углей;

– разработаны, апробированы и запатентованы новые технологические схемы и конструкции горелочно-сопловых устройств вихревых топок, позволяющие интенсифицировать тепло- и массоперенос, повысить экономичность сжигания и снизить вредные выбросы.

**Практическая ценность работы** определяется тем, что:

– реализованные в пакете прикладных программ методики расчета сушки и гранулометрического состава измельченного в мельнице топлива позволяют получить исходные данные для расчета выгорания топлива в НТВ-топке;

– внедрение новых технологических схем и конструкций горелочно-сопловых устройств позволило повысить эффективность НТВ-сжигания и снизить вредные выбросы при модернизации котельных установок паропроизводительностью от 18 до 61 кг/с на широкой гамме твердых топлив (торфе; сланце; бурых углях; каменных углях марок Т, СС, Г и Д);

– отработана эффективная технологическая схема многотопливной НТВ-топки для сжигания торфа, угля и природного газа;

– проверенные практикой технологические решения могут быть использованы при реконструкции действующего и создании нового котельно-топочного оборудования на других марках твердого топлива.

**Реализация работы.** Результаты работы использованы на Кумертауской ТЭЦ, Новомосковской ГРЭС, Кировской ТЭЦ-4, МУП "Южная тепловая станция" (г. Рубцовск), ТЭЦ Бумажного комбината (г. Инкоу, Китай), Хабаровской ТЭЦ-1, Балтийской ЭС (г. Нарва, Эстония), в проектах модернизации действующего и создания нового котельно-топочного оборудования на основе НТВ-сжигания, а также в учебном процессе.

**Достоверность и обоснованность** результатов работы подтверждается: физической обоснованностью разработанных математических моделей и исходных предпосылок для расчетов; использованием апробированных методик исследований; результатами испытаний (в т. ч. межведомственных) и опытом эксплуатации котельных установок с НТВ-технологией сжигания; удовлетворительным согласованием расчетных данных с экспериментальными данными автора и других исследователей.

**Автор защищает:** результаты теоретических и экспериментальных исследований, разработанные методики расчета процессов измельчения и сушки в ППС с быстроходными мельницами (без сепаратора); технологические схемы и конструкции горелочно-сопловых устройств, обеспечивающие эффективное НТВ-сжигание твердых топлив; результаты внедрения выполненного комплекса работ в практику теплоэнергетики.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач исследований, их планировании и организации, обобщении экспериментальных данных и разработке математических моделей измельчения и сушки полидисперсного топливного материала в ППС с быстроходными мельницами, разработке технических заданий на проектирование, руководстве и участии в проектировании, авторском надзоре за монтажом, организации пуско-наладочных работ, режимно-наладочных, балансовых и специальных испытаний модернизированных котельных установок с НТВ-технологией сжигания.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Республиканской научно-технической конференции (НТК) "Повышение эффективности использования топлива в энергетике, промышленности и на транспорте" (Киев, 1989); Всесоюзном научно-техническом совещании по вопросам создания котельного оборудования для модернизации электростанций (Ростов-на-Дону, 1990); Международной конференции по энергетике и охране окружающей среды (Шанхай, Китай, 1995); Международной энергоэкологической НТК "Повышение эффективности использования топлива в энергетике, промышленности и на

транспорте" (Санкт-Петербург, 1995); Международном симпозиуме по энергетике в целлюлозно-бумажной промышленности (Белгород, 1995); Российской НТК "Инновационные наукоемкие технологии для России" (Санкт-Петербург, 1995); II–IV научно-практических конференциях (НПК) "Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов" (Челябинск, 1996, 2001, 2007); НТК "Экология-97" (Санкт-Петербург, 1997); IV Международном симпозиуме по сжиганию угля (Пекин, Китай, 1999); I Международном Бизнес-Форуме "Информационные бизнес-технологии XXI века" (Санкт-Петербург, 1999); Зональном совещании по вопросам сжигания местных низкосортных углей (Владивосток, 1999); Международной НПК "Технология энергосбережения, строительство и эксплуатация инженерных систем" (Санкт-Петербург, 2000); Международной НПК "Проблемы и пути совершенствования угольной теплоэнергетики" (Киев, Украина, 2000); НПК "Внедрение современных технологий энергосбережения в промышленность и коммунальное хозяйство" (Санкт-Петербург, 2000); Всероссийском научно-техническом семинаре "Новые технологии сжигания твердого топлива: их текущее состояние и использование в будущем" (Москва, 2001); Научно-практическом семинаре "Энергоэффективные и энергосберегающие техника и технологии-2000" (Санкт-Петербург, 2000); НТК ДВГТУ (Владивосток, 1997, 1998); Семинаре ПЭИПК "Новые технологии эффективного использования топлива, модернизации и ремонта котельных установок" (Санкт-Петербург, 2000); Международной НПК "Устойчивое развитие и использование биотоплива – путь к реализации Киотского протокола и повышению комплексности использования древесины и торфа" (Санкт-Петербург, 2001); V Международной конференции "Теплоэнергетика XXI века: перспективы развития" (п. Верхнеднепровский Смоленской обл., 2002); Конференции "Котлы нового поколения; модернизация действующего котельного парка" (Санкт-Петербург, 2003); III НПК "Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий" (Санкт-Петербург, 2003); III и V НПК "Угольная энергетика: Проблемы реабилитации и развития" (Алушта, Украина, 2004 и 2009); Всероссийском тематическом семинаре "Экология в энергетике-2004" (Москва, 2004); IV и VI Всероссийских семинарах вузов по теплофизике и теплоэнергетике (Владивосток, 2005; Красноярск, 2009); IV Международной НТК "Достижения и перспективы развития энергетики Сибири" (Красноярск, 2005); Национальной конференции по теплоэнергетике НКТЭ-2006 (Казань, 2006); VI и VII Всероссийских конференциях "Горение твердого топлива" (Новосибирск, 2006 и 2009); Международных конференциях по энергетике (Врнячка Баня, Сербия, 2008 и 2010); на Научном совете РАН по проблеме "Энергомашиностроение" (2005); в ОАО "ВТИ", ОАО "НПО ЦКТИ", ОАО "Сибэнергомаш", ОАО ТКЗ "Красный котельщик", ОАО "Башкирэнерго", ОАО "Свердловэнерго" и на кафедре РИПГС СПбГПУ в 1987–2010 гг.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 100 работ, в т. ч. 8 – в изданиях из перечня ВАК, получено 4 патента на изобретения России, 3 патента Украины и 3 Евразийских патента.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 189 источников, и одного приложения. Она изложена на 227 с. текста, имеет 61 рисунок и 20 таблиц. Общий объем диссертации – 234 с.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, отмечены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** посвящена анализу особенностей, опыта и недостатков НТВ-сжигания.

В отличие от традиционной технологии пылеугольного сжигания в прямоточном факеле, где основная часть топлива (до 92...96 %) сгорает в зоне активного горения (ЗАГ), расположенной вблизи горелок и занимающей относительно небольшой объем камерной топки, в НТВ-топке ЗАГ включает в себя еще и весь объем топочной воронки. Поэтому тепловое напряжение объема ЗАГ в НТВ-топке при равной мощности котлов в 1,5...2 раза ниже. Это позволяет снизить максимальную температуру в вихревой топке (примерно на 100...300 К) и за счет активного перемешивания выровнять температуру в вихревой зоне.

Пониженный уровень температур, ступенчатый ввод окислителя, многократная циркуляция горящих частиц и угрубление гранулометрического состава золы в совокупности улучшают показатели НТВ-топок по вредным выбросам (оксидам азота  $\text{NO}_x$  и диоксиду серы  $\text{SO}_2$ ) и повышают эффективность работы золоулавливающего оборудования.

Активное перемешивание в вихревой зоне интенсифицирует тепло- и массообмен, улучшает условия воспламенения и выгорания топлива. Пониженная температура факела исключает шлакование поверхностей нагрева, что также повышает тепловую эффективность топки.

Подготовка топлива для НТВ-сжигания происходит в ППС с использованием, как правило, типовых быстроходных мельниц: молотковых (ММ) или мельниц-вентиляторов (М-В). Для подготовки пыли грубого помола отработаны ППС прямого вдувания с ММ и М-В, оборудованными упрощенными сепараторами, либо без сепараторов. Угрубление помола увеличивает производительность ППС и обеспечивает ее взрывобезопасность.

Аэродинамические схемы и конструкции горелочно-сопловых устройств вихревых топок можно классифицировать следующим образом:

по типу топки – *открытая* и *полуоткрытая*, последняя может быть с *перережимом*, либо с *козырьками*;

по исполнению устья топочной воронки – *открытое* и *закрытое*;  
по типу системы нижнего дутья (СНД) – *сопловой* и *камерный*; возможно *дискретное* или *непрерывно-распределенное* исполнение.

Следует отметить, что НТВ-топки полуоткрытого типа с пережимом близки к известным высокотемпературным вихревым топкам (с пересекающимися струями) МЭИ, ВТИ и ЦКТИ, в которых пережим использован для формирования вихревого движения в ЗАГ, однако только в НТВ-топке вихревое движение факела дополнительно обеспечивается взаимодействием горелочных струй с потоками из СНД.

Опыт освоения НТВ-сжигания показал, что при определенных условиях возникают повышенный механический недожог топлива  $q_4$ , эрозионный износ поверхностей нагрева, недостаточный перегрев пара.

Первые две проблемы в основном были связаны с несовершенством конструкции вихревой топки и горелочно-сопловых устройств, а иногда возникали при чрезмерно угрубленном размоле топлива.

Недостаточный перегрев был обусловлен скудностью экспериментальных данных о теплообмене в вихревых топках и, как следствие, ошибками в расчетах.

Анализ методического обеспечения НТВ-технологии сжигания высветил определенные пробелы.

Так, например, отработка систем подготовки топлива угрубленного помола (на основе ППС с быстроходными мельницами) в основном опиралась на экспериментальную проверку различных технических решений, которые, как правило, базировались на приближенных расчетных оценках и экстраполяции нормативных зависимостей в область грубого помола. В ряде случаев это не давало ожидаемого результата, что существенно осложняло внедрение НТВ-технологии и приводило к материальным издержкам.

Рекомендуемый диапазоном помола для НТВ-сжигания  $R_{90} = 70...90\%$  находится за пределами применимости нормативного метода ( $R_{90}$  не более  $40...65\%$ ).

Как известно, размольная производительность  $B_m$ , кг/с, мельницы определяется произведением параметров, учитывающих конструктивные и режимные характеристики мельницы  $C_{\text{констр}}$ , физико-технические характеристики измельчаемого топлива  $K_{\text{разм}}$ , тонину помола  $K_{\text{тонк}}$ , энергетическую нагрузку мельницы  $C_{\text{нагр}}$  и условия ее вентиляции  $K_{\text{вент}}$ :

$$B_m = C_{\text{констр}} C_{\text{нагр}} K_{\text{разм}} K_{\text{тонк}} K_{\text{вент}} . \quad (1)$$

Анализ показал, что конструкция сепаратора влияет на все параметры, входящие в равенство (1). В частности, для грубого помола характер зависимости  $K_{\text{тонк}} = f(R_{90})$  резко изменяется.

Выявились существенные расхождения нормативных методов расчета ППС с экспериментальными данными, полученными на промышленных установках. Показано, что погрешность нормативного метода расчета  $B_m$  в области грубого помола может достигать 100 %.

Нормативный метод расчета сушки топлива в ППС основан на балансовых соотношениях в предположении достижения пылью равновесной влажности. Фактически такая степень подсушки измельчаемого материала возможна лишь при очень тонком помоле и весьма продолжительном времени пребывания топлива в ППС. Время пребывания топлива в ППС с быстроходными мельницами составляет несколько секунд, и пренебрежение кинетикой сушки в этом случае приводит к недопустимым погрешностям расчета.

К анализу методик определения конечной влажности пыли в ППС с быстроходными мельницами привлечены результаты исследований ВТИ, ЦКТИ, БелЭНИН и др. Показано, что в основном разработчики предлагают эмпирические зависимости, апробированные на ограниченном количестве объектов. Попытку учесть кинетику сушки содержит проект новой редакции норм, однако область применения предлагаемых в нем зависимостей ограничена по влажности пыли  $W^{\text{пл}} = 0,5...20$  %, тонине помола  $R_{90} = 8...60$  % и не охватывает ППС, предназначенных для угрубленного помола.

Расчеты конечной влажности пыли, выполненные по известным методикам для ППС прямого вдувания, для М-В 1600/600/980 без сепаратора при угрубленном помоле высоковлажного башкирского угля дали существенное расхождение с опытными данными: относительное отклонение варьировалось в пределах 26...52 %.

Таким образом, отсутствие надежных методов расчета ППС с угрубленным помолом является пробелом в методическом обеспечении НТВ-технологии сжигания.

**В главе 2** приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований закономерностей измельчения топлива в мельницах.

В качестве характеристики гранулометрического состава топлива наряду с традиционными показателями  $R_5$  и  $R_{90}$  предложено использовать средние по массе размеры частиц  $D_s$  (для дробленки) и  $d_s$  (для пыли).

Показано, что кратность измельчения топлива в мельнице  $i_s = D_s / d_s$  хорошо согласуется с показателем помола  $R_{90}$  и более достоверно характеризует интенсивность измельчения по сравнению с величиной  $i_{\text{max}} = D_{\text{max}} / d_{\text{max}}$ , определяемой как отношение максимальных размеров кусков до размола  $D_{\text{max}}$  и после него  $d_{\text{max}}$ .

Расчет показал, что для промышленных мельниц, оснащенных сепараторами, кратность измельчения  $i_s = 20...100$ , а  $i_{\text{max}} = 10...180$  [нижний предел

соответствует размолу бурых углей в быстроходных мельницах, верхний – антрациту в шаровых барабанных мельницах (ШБМ)].

В теории измельчения наиболее известны законы Риттингера (энергия разрушения пропорциональна вновь образованной поверхности), Кика – Кирпичева (работа пропорциональна объему измельчаемого тела), Бонда (эмпирическая зависимость энергозатрат от параметров измельчения). Согласно этим законам, удельная энергия, затраченная на размол,  $\mathcal{E}$ , Дж/кг, пропорциональна *показателю измельчения*  $P$ , принятому по соответствующей гипотезе. Например, закон Риттингера можно записать в следующем виде:

$$\mathcal{E} = k_R P_R = k_R \frac{i_s - 1}{D_s}, \quad (2)$$

где  $k_R$  – коэффициент пропорциональности (Риттингера), Дж·м/кг;  $P_R$  – *показатель измельчения* (Риттингера),  $m^{-1}$ ,  $P_R = (i_s - 1)/D_s$ .

Законы Кика – Кирпичева и Бонда дают, соответственно,

$$\mathcal{E} = k_K P_K = k_K \ln i_s \quad \text{и} \quad \mathcal{E} = k_B P_B = k_B (i_s^{0,5} - 1) D_s^{-0,5}.$$

Проверка законов измельчения выполнена по экспериментальным данным, полученным В.П. Осокиным при размоле воздушно-сухого экибастузского угля в вентилируемой стендовой ММ, имеющей диаметр ротора 0,3 м, с инерционным сепаратором. В опытах расход топлива  $B$  изменялся в пределах 11...25 кг/с при окружной скорости ротора  $u$ , равной 50...78 м/с; кратность измельчения  $i_s$  изменялась в пределах 18...250 при исходной крупности топлива  $D_s = 3,4...12,8$  мм,  $D_{\max} = 7...25$  мм.

Аппроксимация экспериментальных данных (рис. 1) прямыми  $e(P_R)$ ,  $e(P_K)$ ,  $e(P_B)$  (где  $e$  – удельные затраты энергии на размол, приведенные к мощности при  $u = 50$  м/с) выявила преимущество закона Риттингера по сравнению с законами Кика – Кирпичева и Бонда.

В дальнейших исследованиях использовался закон Риттингера и представления о кратности измельчения  $i_s$ .

*Коэффициент Риттингера*  $k_R$  в уравнении (2) учитывает условия измельчения и характеристики измельчаемого материала. В первом приближении к ним относятся:

1) параметр, учитывающий конструкцию и режим работы (например, частоту вращения ротора, вентиляцию) мельницы,  $k_c$ , где индекс  $c$  означает "условие" (от англ. *condition*);

2) параметр, учитывающий физико-химические и физико-механические свойства измельчаемого материала,  $k_g$ , где индекс  $g$  означает "измельчение"

(от англ. *grind*), который можно назвать *коэффициентом сопротивления измельчению*.

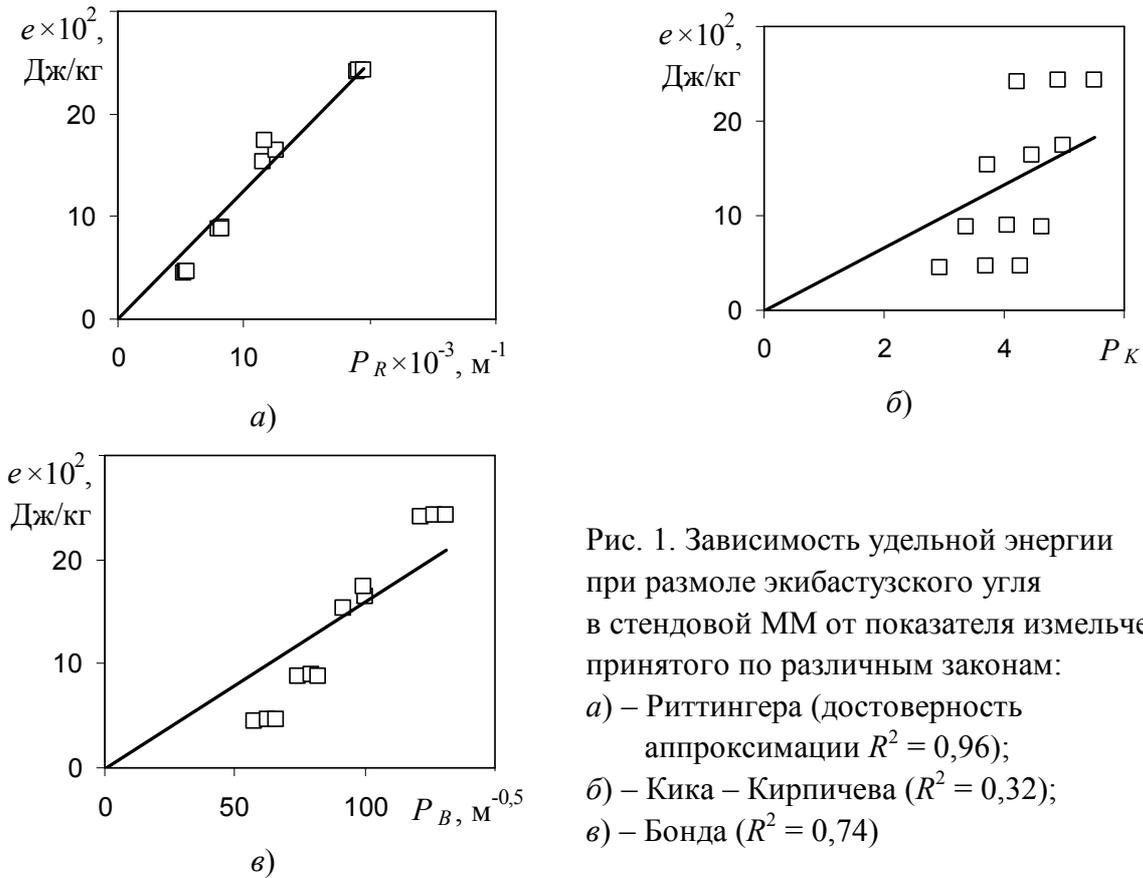


Рис. 1. Зависимость удельной энергии при размоле экибастузского угля в стендовой ММ от показателя измельчения, принятого по различным законам:  
 а) – Риттингера (достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,96$ );  
 б) – Кика – Кирпичева ( $R^2 = 0,32$ );  
 в) – Бонда ( $R^2 = 0,74$ )

Закон Риттингера (2) можно записать в следующем виде:

$$\mathcal{E} = k_R P_R = \frac{k_g}{k_c} P_R. \quad (3)$$

Для коэффициента  $k_g$  предложено соотношение

$$k_g = \frac{6k_m k_W}{\rho_K}, \quad (4)$$

где  $k_m$  – параметр, отражающий затраты энергии на образование  $1 \text{ м}^2$  поверхности, Дж/м<sup>2</sup>;  $k_W$  – поправка на влажность;  $\rho_K$  – кажущаяся плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Выдвинута и экспериментально подтверждена гипотеза о том, что

$$k_m \sim A \rho_K^n. \quad (5)$$

Обработка опытных данных Грюндера, изучавшего измельчение различных материалов (бурого и каменного углей, стекла и др.), в пределах изменения

$k_m = 0,5 \dots 3,3$  Дж/м<sup>2</sup> и  $\rho_k = 1000 \dots 2500$  кг/м<sup>3</sup> дала в формуле (5) показатель степени  $n = 2,07$  и коэффициент пропорциональности  $A = 3 \cdot 10^{-7}$  (при дисперсии аппроксимации  $R^2 = 0,997$ ).

В расчетах ППС используют относительный лабораторный коэффициент размолоспособности  $K_{\text{ло}} = \mathcal{E}^{\text{ЭТ}} / \mathcal{E}$ . Введем понятие *относительного коэффициента измельчаемости*  $K_G$ , равного отношению коэффициентов сопротивления измельчению эталонного топлива  $k_g^{\text{ЭТ}}$  к испытуемому  $k_g$ . Из уравнения (3) имеем равенства  $k_g^{\text{ЭТ}} = \mathcal{E}^{\text{ЭТ}} k_c^{\text{ЭТ}} / P_R^{\text{ЭТ}}$  и  $k_g = \mathcal{E} k_c / P_R$ , отношение которых при  $k_c^{\text{ЭТ}} = k_c = \text{const}$ ,  $P_R^{\text{ЭТ}} = P_R = \text{const}$  (т. е.  $D_s^{\text{ЭТ}} = D_s = \text{const}$  и  $d_s^{\text{ЭТ}} = d_s = \text{const}$ ) дает выражение

$$K_G = \frac{k_g^{\text{ЭТ}}}{k_g} = \frac{\mathcal{E}^{\text{ЭТ}}}{\mathcal{E}}, \quad (6)$$

из которого следует, что относительные коэффициенты  $K_G$  и  $K_{\text{ло}}$  являются аналогами и оба характеризуют сопротивляемость топлива измельчению. Однако численно эти коэффициенты различаются, т. к. коэффициент  $K_G$  связан с осредненными размерами частиц, а коэффициент  $K_{\text{ло}}$  определяют по приближенной зависимости, связывающей поверхность пыли с остатком на сите  $R_{90}$ . На основе анализа гранулометрических характеристик 28 различных материалов ( $K_{\text{ло}} = 0,64 \dots 2,8$ ), измельченных в Топливной лаборатории ВТИ, а также данных литературы (по 141 топливу) установлена приближенная связь

$$K_G \cong (K_{\text{ло}})^{1,4}. \quad (7)$$

Показатель измельчения  $P_R$  в уравнениях (2) и (3) однозначно связывает крупность топлива до размола  $D_s$  и после него  $d_s$ . С другой стороны, как видно из уравнения (3),  $P_R$  зависит от конструкции измельчителя ( $k_c$ ), размолоспособности топлива ( $k_g$ ) и удельной энергии, затраченной на размол ( $\mathcal{E}$ ). Из уравнения (3) следует, что при  $\mathcal{E} = \text{const}$ ,  $k_c = \text{const}$  и  $k_g = \text{const}$  показатель измельчения

$$P_R = \frac{i_s - 1}{D_s} = \text{const}, \quad (8)$$

и

$$i_s = P_R D_s + 1. \quad (9)$$

Другими словами, с повышением исходной крупности топлива  $D_s$  пропорционально должна возрастать и величина  $(i_s - 1)$ , включающая кратность его измельчения.

Проверка уравнений (8) и (9) выполнена по экспериментальным данным ВТИ, БелЭНИН и В.П. Осокина, полученным при измельчении различных топлив в лабораторных и стендовых установках.

Измельчение каменных и бурых углей, шлама, сланца (12 топлив с  $K_{\text{ло}} = 0,56 \dots 1,86$ ,  $D_s = 0,145 \dots 8,3$  мм; 88 опытов, данные ВТИ и БелЭНИН) в воздушно-сухом состоянии проводилось методом истирания в невентилируемой лабораторной ШБМ. Обработка данных (рис. 2) подтвердила линейный характер зависимости (9) с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,983 \dots 0,999$ .

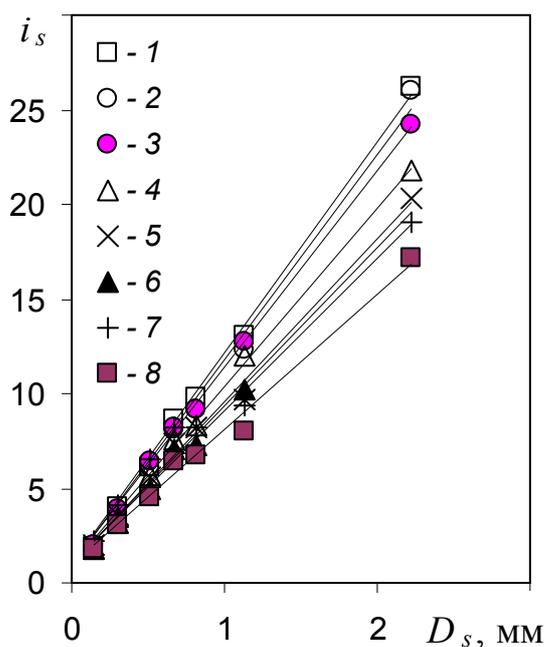


Рис. 2. Зависимость кратности измельчения  $i_s$  от среднего по массе размера  $D_s$  частиц в исходной пробе (размол воздушно-сухих углей в лабораторной ШБМ):

- 1 – нерюнгринский СС ( $K_{\text{ло}} = 1,86$ );
- 2 – подмосковный 2Б ( $K_{\text{ло}} = 1,77$ );
- 3 – донецкий Т ( $K_{\text{ло}} = 1,68$ );
- 4 – кузнецкий Г ( $K_{\text{ло}} = 1,55$ );
- 5 – березовский 2Б ( $K_{\text{ло}} = 1,44$ );
- 6 – башкирский 1Б ( $K_{\text{ло}} = 1,4$ );
- 7 – шлам АШ ( $K_{\text{ло}} = 1,4$ );
- 8 – кузнецкий Т ( $K_{\text{ло}} = 1,29$ )

Аналогичный результат получен при обработке данных ВТИ по измельчению ударом в приборе ОР-ВТИ и раздавливанием по методу Хардгрова (в модели невентилируемой среднеходной мельницы) АШ, кузнецкого каменного и березовского бурого углей ( $K_{\text{ло}} = 1,04 \dots 1,56$ ; 42 опыта).

Следующим подтверждением уравнения (9) служат зависимости  $i_s$ , полученные при измельчении воздушно-сухого экибастузского угля на стенде с вентилируемой ММ, от среднего (по массе) исходного куска  $D_s$  и от удельной энергии  $e$ , затраченной на размол. Как видно на рис. 3, при  $e = \text{const}$  кратность измельчения  $i_s$  возрастает с увеличением  $D_s$  линейно.

Анализ размола воздушно-сухого ( $W^{\text{гн}} = 13\%$ ) и увлажненного ( $W = 32\%$ ) назаровского бурого угля (на стенде БелЭНИН) в вентилируемой модели М-В 1600/500/980, уменьшенной в 5,33 раза, без сепаратора в изотермических условиях (32 опыта,  $D_s = 2,2 \dots 50$  мм,  $D = 1,25 \dots 60$  мм) подтвердил закон Риттингера и показал (рис. 4), что повышение влажности угля от гигроскопической до близкой к рабочей снижает интенсивность измельчения не-

значительно. Усредненные показатели измельчения  $P_R$  различались в пределах погрешности определения (около 10 %). Полученный результат принципиально расходится с устоявшимися представлениями о влиянии влаги на размолоспособность топлива и противоречит нормативным зависимостям, учитывающим поправки на влажность  $\Pi_{вл1}$  и  $\Pi_{вл2}$ .

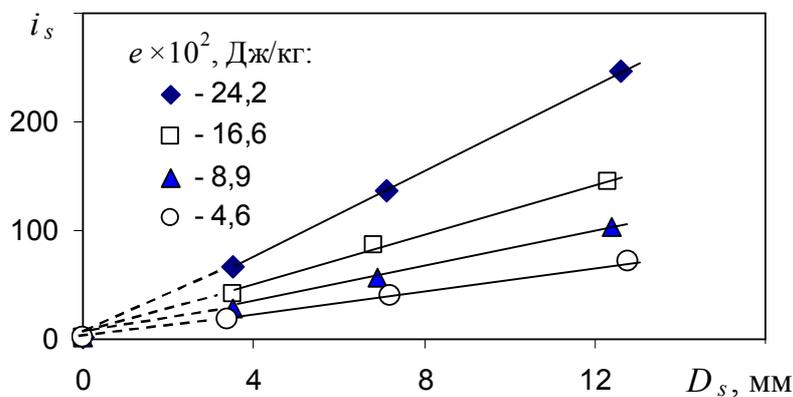


Рис. 3. Изменение кратности измельчения в зависимости от удельной энергии (обработка данных В.П. Осокина)

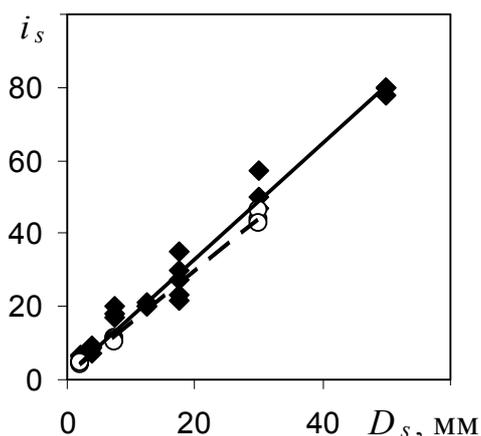


Рис. 4. Изменение кратности измельчения назаровского бурого угля на стенде БелЭНИН при влажности:  
 ◆ –  $W = 13\%$ ; ○ –  $W = 33\%$

Экспериментальные исследования размола в промышленных условиях проводились параллельно с обработкой технологических схем ППС прямого вдувания для НТВ-топок.

Было исследовано 6 вариантов ППС с М-В 1600/600/980: с типовым инерционным сепаратором и пылеконцентратором (ПК); с сепаратором УралВТИ и ПК; без сепаратора, но с ПК (газовая и воздушная сушка); без сепаратора и ПК (газовая, газозвушная и воздушная сушка).

Установлено, что максимальное угрубление помола при допустимой (по условиям нормальной работы оборудования) нагрузке на башкирском угле обеспечивают:

ППС с типовым инерционным сепаратором и ПК – до  $R_{1000} = 7\%$ ;  $R_{90} = 74\%$ ;  $d_s = 0,19$  мм;  $i_s = 27$ ; при  $B_M = 5,7$  кг/с;

ППС с прямоточным сепаратором УралВТИ и ПК (газовая сушка) и ППС без сепаратора, но с ПК (газовая и воздушная сушка) – до  $R_{1000} = 13\%$ ;  $R_{90} = 67\%$ ;  $d_s = 0,17$  мм;  $i_s = 30$ ; при  $B_M = 5,9$  кг/с;

ППС без сепаратора и ПК (газовая, газозвушная и воздушная сушка) – до  $R_{1000} = 30 \%$ ;  $R_{90} = 90 \%$ ;  $d_s = 0,55 \text{ мм}$ ;  $i_s = 9$ ; при  $B_M = 10 \dots 11 \text{ кг/с}$ .

Максимальная производительность по топливу бессепараторных ППС ограничена условиями пневмотранспорта (при наличии ПК) и условиями сушки (в отсутствие ПК).

Схемы ППС с газозвушной и воздушной сушкой позволяют регулировать вентиляцию М-В и снизить присосы до  $K_{прс} = 0,1 \dots 0,15$ . Однако ППС с ленточными питателями при воздушной сушке недостаточно надежны. Удельные затраты электроэнергии на размол и пневмотранспорт  $\mathcal{E}_{общ}$  для ППС без сепаратора и ПК при максимальной нагрузке ( $B_M = 10 \dots 11 \text{ кг/с}$ ) снижаются до  $5 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ .

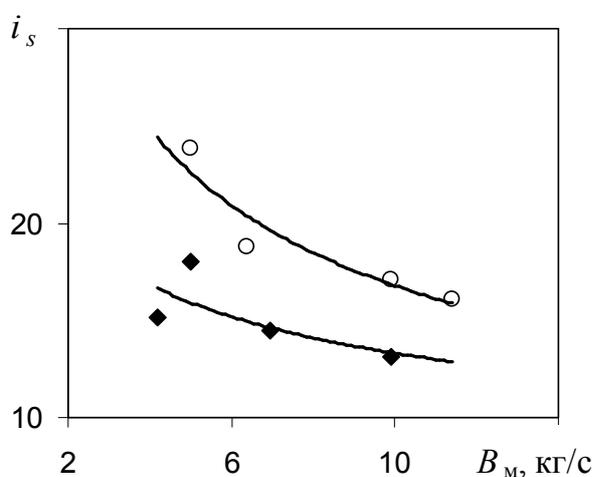


Рис. 5. Изменение кратности измельчения в зависимости от производительности мельницы при различной исходной крупности топлива:  
 ◆ –  $D_s = 13,5 \text{ мм}$ ; ○ –  $D_s = 17,3 \text{ мм}$

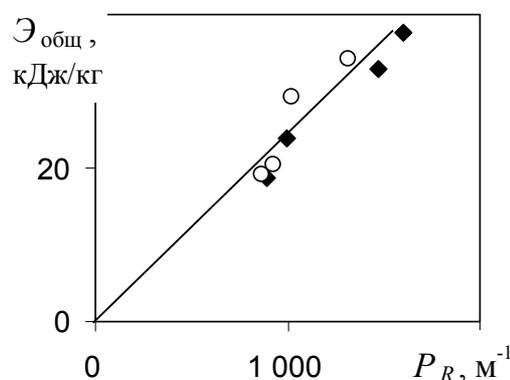


Рис. 6. Зависимость удельной энергии, затраченной на размол и пневмотранспорт, от показателя измельчения при размоле башкирского бурого угля в ППС с М-В 1600/600/980 без сепаратора и ПК в режимах газовой (◆) и газозвушной (○) сушки

В ППС без сепаратора и ПК кратность измельчения  $i_s$  растет с повышением крупности  $D_s$  исходного топлива и снижается с увеличением топливной загрузки мельницы  $B_M$  (рис. 5). Показатель измельчения  $P_R$  изменяется в пределах  $860 \dots 1600 \text{ м}^{-1}$  (при топливной нагрузке  $B_M = 4,2 \dots 11,4 \text{ кг/с}$ ). Удельные затраты энергии на размол  $\mathcal{E}_{общ}$  (рис. 6) зависят от показателя  $P_R$  линейно (с достоверностью аппроксимации  $0,87$ ), что подтверждает закон Риттингера. Тангенс угла наклона аппроксимирующей линии на рис. 6 равен коэффициенту пропорциональности  $k_R$  в уравнениях (2) и (3); для ППС с М-В 1600/600/980 (без сепаратора и ПК)  $k_R = 24 \text{ (Дж}\cdot\text{м)/кг}$ . Таким образом, в широких пределах изменения топливной нагрузки отношение  $\mathcal{E}_{общ}/P_R$  является постоянным и равным коэффициенту Риттингера  $k_R$ .

Для НТВ-топок полуоткрытого типа (с закрытым устьем топочной воронки и сопловым исполнением СНД) отработана и рекомендована к внедрению технологическая схема ППС с М-В без сепаратора и ПК с газозвушной сушкой, позволяющая угрубить помол высоковлажного бурого угля до  $R_{90} = 90 \%$ ,  $R_{1000} = 30 \%$  и  $d_{\max} < 6$  мм при максимальной топливной нагрузке  $B_M = 10 \dots 11$  кг/с.

Угрубление помола в ММ отработано на промышленной ППС с ММТ 1500/2510/735 для харанорского, баганурского и гусиноозерского бурых углей (сушильный агент – горячий воздух) в четырех вариантах исполнения инерционного сепаратора и без него.

В ППС без сепаратора (при  $B_M = 6 \dots 14$  кг/с) помол имел следующие характеристики:  $R_{10} = 0,1 \dots 3 \%$ ,  $R_5 = 4 \dots 10 \%$ ,  $R_{1000} = 38 \dots 63 \%$ ,  $R_{360} = 50 \dots 80 \%$ ,  $d_s = 1,5 \dots 2,6$  мм и  $d_{\max} = 7 \dots 16$  мм. Кратность измельчения в зависимости от исходной крупности топлива изменялась в соответствии с законом Риттенгера (рис. 7) с достоверностью аппроксимации опытных данных 0,93; показатель измельчения  $P_R$  составил  $230 \dots 580 \text{ м}^{-1}$ .

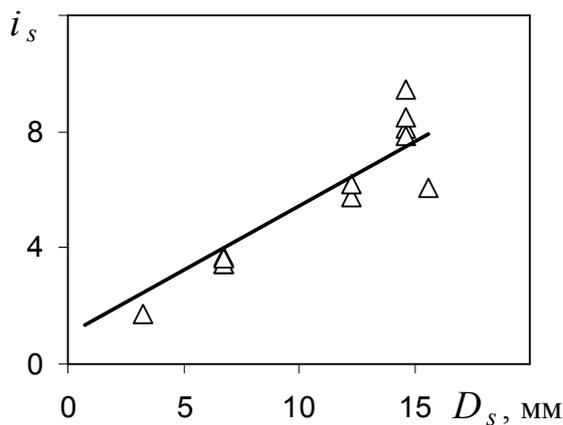


Рис. 7. Изменение кратности измельчения в зависимости от среднего размера куска исходного топлива при размоле бурых углей восточных месторождений в ППС с ММТ 1500/2510/735 без сепаратора

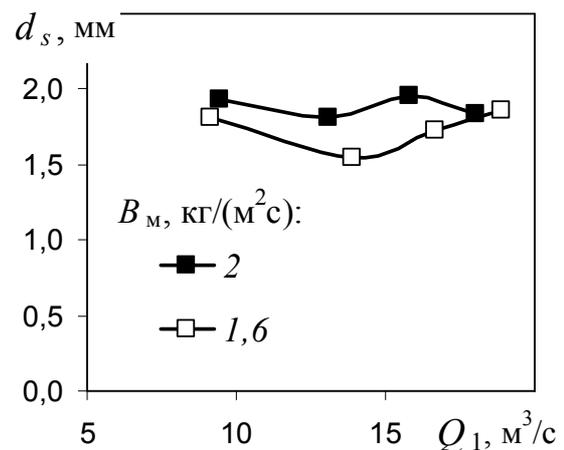


Рис. 8. Изменение среднего размера зерна в зависимости от расхода сушильного агента и удельной нагрузки на ротор мельницы

Влияние топливной загрузки  $B_M$  и исходной крупности топлива  $D_s$  на кратность измельчения  $i_s$  оказалось аналогичным ППС с М-В.

Четкой зависимости влияния вентиляции мельницы на крупность измельчения проследить не удалось. Так, в двух сериях опытов (рис. 8) при неизменных удельных нагрузках топлива на ротор мельницы  $B_M$ , равных 1,6 и 2 кг/(м<sup>2</sup>с), и изменении расхода сушильного агента  $Q_1$  в пределах от 9,2 до

18,9 м<sup>3</sup>/с средний размер зерна  $d_s$  менялся в диапазоне от 1,55 до 1,96 мм, что укладывается в погрешность определения  $d_s$ .

Отработан и рекомендован к внедрению для НТВ-топок полуоткрытого типа (с закрытым устьем топочной воронки и сопловым исполнением СНД) инерционный сепаратор к ППС с ММ, позволяющий углубить помол бурого угля до  $R_{90} = 85...90\%$ ,  $R_{1000} = 15...20\%$  и  $d_{\max} < 10$  мм при максимальной топливной нагрузке  $B_m = 12...14$  кг/с.

**Глава 3** посвящена методикам расчета упрощенных (без сепаратора) ППС с быстроходными мельницами.

Предложен новый подход к расчету размольной производительности быстроходных мельниц, суть которого сводится к следующему.

1. Для характеристики гранулометрического состава топлива до и после размола предлагается использовать средние по массе размеры  $D_s$  и  $d_s$ .

2. Кратность измельчения топлива в мельнице  $i_s$  определяется как отношение средних по массе размеров частиц до размола  $D_s$  и после него  $d_s$ .

3. В качестве основного уравнения, описывающего связь затрат энергии на размол топлива  $\mathcal{E}$  и показателей измельчения ( $P_R$ ,  $i_s$ ,  $d_s$ ), принята вытекающая из закона Риттингера зависимость (2) или ее эквивалент (3).

4. Конструктивный параметр  $k_c$  для быстроходных мельниц на данном этапе определён по нормативным зависимостям.

5. Размольные свойства топлива учитываются коэффициентом сопротивления измельчению  $k_g$ . В пересчетах с одного топлива на другое можно использовать относительный коэффициент измельчаемости  $K_G$ .

6. Крупность исходного топлива  $D_s$  связана со степенью помола  $i_s$  и показателем измельчения соотношением  $P_R = (i_s - 1)/D_s$ .

7. Влиянием влажности топлива на коэффициент сопротивления измельчению  $k_g$  в первом приближении можно пренебречь.

8. В качестве основной величины принята размольная производительность  $B_m$  (в том числе при работе на высоковлажном топливе). Расчет сушки производится по размольной производительности мельницы.

Из уравнения (3) с учетом того, что  $\mathcal{E} = N / B_m$ , получено выражение для размольной производительности мельницы

$$B_m = N / (k_R P_R), \text{ кг/с}, \quad (10)$$

где  $N$  – мощность, затраченная на размол, кВт.

Учитывая, что для каждого топлива соотношение  $\mathcal{E} / P_R$  в уравнении (3) является постоянным и равным коэффициенту пропорциональности Риттингера  $k_R = k_g / k_c$ , при переходе на другое топливо и типоразмер мельницы (в

общем случае, когда  $k_c \neq \text{const}$  и  $k_g \neq \text{const}$ ) пересчет коэффициента  $k_{R_1}$  на  $k_{R_2}$  можно выполнить следующим образом:

$$k_{R_2} = k_{R_1} \frac{k_{c_1}}{k_{c_2}} \cdot \frac{K_{G_1}}{K_{G_2}}, \quad (11)$$

где индексы 1 и 2 относятся к исходным и новым условиям измельчения, соответственно.

Проверка того, насколько применима формула (10), выполнена на экспериментальных данных, полученных при испытании промышленной ППС с М-В 1600/600/980 при беспаратороном размоле башкирского угля в режимах газовой и газовойсухой суши.

Во время опытов значения отдельных показателей изменялись в следующих пределах: нагрузка мельницы  $B_M = 4,2 \dots 11,4$  кг/с; гранулометрический состав исходного топлива  $R_5 = 35 \dots 67$  %,  $R_{10} = 20 \dots 45$  % и  $D_{\max}$  – до 60 мм при влажности  $W^r = 56 \dots 59$  %; гранулометрический состав продукта измельчения  $R_{90} = 67 \dots 91$  %,  $R_{1000} = 15 \dots 31$  % и  $d_{\max} = 4 \dots 6$  мм при влажности  $W^{\text{пл}} = 32 \dots 51$  %; влагосъем  $\Delta W = 0,12 \dots 0,4$  кг/кг; кратность измельчения топлива  $i_s = 13 \dots 24$ , показатель измельчения  $P_R = 860 \dots 1600$  м<sup>-1</sup> и удельный расход электроэнергии на размол  $\mathcal{E}_{\text{общ}} = 18,7 \dots 37,8$  кДж/кг (5,2...10,5 кВт·ч/т).

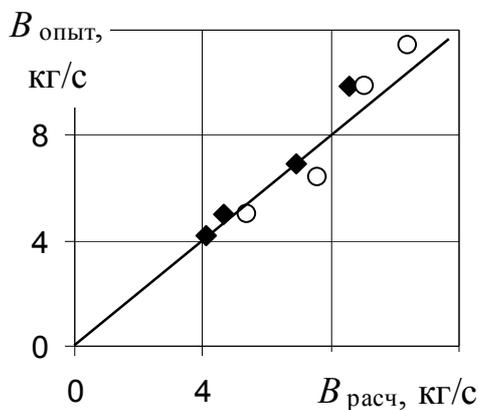


Рис. 9. Сопоставление расчетных и опытных значений производительности М-В при размоле башкирского угля в режимах газовой (◆) и газовойсухой (○) суши

Усредненное по опытам значение коэффициента Риттинера для башкирского угля и данного типоразмера мельницы составило  $k_R = 24$  Дж·м/кг (при  $k_c = 2,27$  и  $k_g = 54,5$ ). Расчет по формуле (10) согласуется с опытными данными в пределах  $\pm 15$  % (рис. 9).

Методика расчета конечной влажности измельченного топлива основана на математическом моделировании суши влажного полидисперсного материала в сквозном двухфазном потоке с учетом кинетики процесса и неизотермичности частиц твердой фазы.

В первую очередь методика ориентирована на ППС с М-В, которые предназначены для размола высоковлажного топлива.

Тракт ППС прямого вдувания с М-В без сепаратора можно разделить на три участка: трубу-сушилку (сушка топлива во взвешенном состоянии в нисходящем потоке), полость мельницы (сушка и размол топлива) и напорный пылепровод (сушка в восходящем потоке). Полагая, что размол происходит при контакте частиц топлива с рабочими лопатками быстроходного колеса мельницы, можно считать, что время размола пренебрежимо мало по сравнению с общим временем пребывания материала в ППС. Тогда можно принять, что сушка протекает только на нисходящем и восходящем участках тракта ППС, длина которых определяется компоновкой оборудования.

Расчетная схема тракта ППС в простейшем случае (без сепаратора и ПК) представлена на рис. 10. Начальное сечение тракта  $A$  – место ввода сырого топлива. Сечение  $B$  – переход нисходящего потока в восходящий – соответствует полости мельницы, сечение  $C$  соответствует выходному сечению горелки.

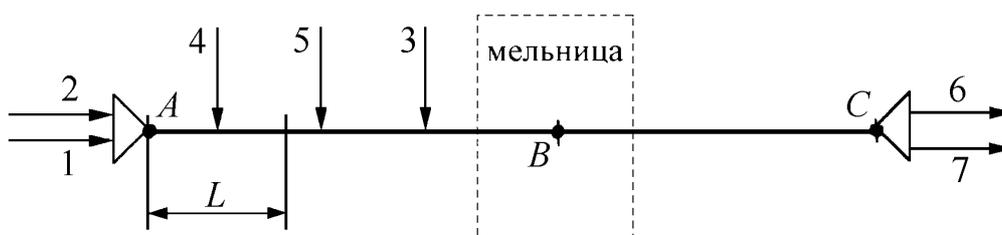


Рис. 10. Расчетная схема тракта ППС прямого вдувания с быстроходной мельницей:  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – характерные сечения тракта;  $L$  – текущая координата; 1 – исходное топливо; 2, 3 – присос холодного воздуха; 4 – инертные газы; 5 – присадка горячего воздуха; 6 – отработавший сушильный агент; 7 – пыль

При построении математической модели сушки полидисперсного материала в сквозном двухфазном потоке приняты следующие допущения: задача одномерна (т. е. осреднение концентраций, температур и т. д. по сечению потока); частицы имеют шарообразную форму (при этом поля температуры и влажности в них одномерны); физические свойства по радиусу частицы не меняются; отсутствуют агрегирование и дробление материала; частицы топлива не взаимодействуют между собой; частицы одной фракции ведут себя одинаково.

Поле температуры в шаровой частице аппроксимировано зависимостью, предложенной А.А. Шрайбером и В.Д. Глянченко,

$$T(r, \tau) = \varphi + \psi r^m, \quad (12)$$

где  $T$ ,  $r$  – соответственно температура и текущий радиус частицы;  $\tau$  – время;  $\varphi = \varphi(\tau)$ ,  $\psi = \psi(\tau)$  – функции времени;  $m = m(\text{Bi}, \text{Fo})$ , где  $\text{Bi}$  – число Био,  $\text{Fo}$  – число Фурье.

Процесс термической обработки состоит из трех стадий: прогрева (I), сушки при постоянной скорости (II) и сушки при падающей скорости (III). Принято, что сушка протекает в мягком режиме, т. е. влага внутри частицы перемещается в виде жидкости, а испарение идет только с поверхности частиц.

Сначала определяем вид функций  $\varphi$  и  $\psi$  для каждой из стадий процесса. Расчет температуры частицы основан на том, что перенос теплоты в частице учитывается более детально, чем массоперенос. Поэтому конкретный вид функций  $\varphi$  и  $\psi$  зависит от теплового состояния частицы, которое, например, для второй стадии процесса (периода постоянной скорости сушки) определяется граничным условием первого рода:

$$T(R, \tau)_{\text{II}} = T_{\text{M}}, \quad (13)$$

где  $T_{\text{M}}$  – температура мокрого термометра. Затем из теплового баланса частицы определяем дифференциальные зависимости для средних по ее объему температуры  $\bar{T}$  и влагосодержания  $\bar{W}$ . Для периода постоянной скорости сушки

$$\left( \frac{d\bar{T}}{d\tau} \right)_{\text{II}} = \frac{12(m+3)\lambda}{c\rho\delta^2} (T_{\text{M}} - \bar{T}), \quad (14)$$

$$\left( \frac{d\bar{W}}{d\tau} \right)_{\text{II}} = -\frac{12\lambda(T_g - T_{\text{M}})}{\rho^d \tilde{r} \delta^2} \left[ \text{Bi} - (m+3) \frac{T_{\text{M}} - \bar{T}}{T_g - T_{\text{M}}} \right], \quad (15)$$

где  $\lambda$ ,  $c$  – теплопроводность и удельная изобарная теплоемкость частицы, соответственно;  $\rho^d$ ,  $\rho$  – плотность сухой и влажной частицы, соответственно;  $\tilde{r}$  – скрытая теплота испарения;  $\delta$  – размер (эквивалентный диаметр) частицы;  $T_g$  – температура газов.

В периоды прогрева (I) и падающей скорости сушки (III) температура поверхности частицы зависит от того, какая доля теплоты, полученной от сушильного агента, пойдет на ее нагрев и испарение влаги. При этом на поверхности частицы действуют граничные условия третьего рода:

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = \alpha [T_g - T(R, \tau)] + \frac{1}{6} \delta \rho^d \tilde{r} \frac{d\bar{W}}{d\tau}, \quad (16)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи. Для обоих периодов

$$\left(\frac{d\bar{T}}{d\tau}\right)_{I,III} = \frac{1}{c\rho} \left[ \frac{6Nu\lambda_g}{\delta^2} (T_g - \bar{T}) + \rho^{d\tilde{r}} \frac{d\bar{W}}{d\tau} \right] \left(1 + \frac{Bi}{m+3}\right)^{-1}, \quad (17)$$

где  $\lambda_g$  – теплопроводность газа;  $Nu$  – число Нуссельта. Скорость сушки в периоде прогрева (I) можно задать приближенной зависимостью, предложенной А.В. Лыковым:

$$\left(\frac{d\bar{W}}{d\tau}\right)_I = \left(\frac{d\bar{W}}{d\tau}\right)_{II} \frac{T(R, \tau) - T_0}{T_M - T_0}, \quad (18)$$

где  $T_0$  – начальная температура частицы. Для периода падающей скорости сушки (III) используется формула Г.К. Филоненко

$$\left(\frac{d\bar{W}}{d\tau}\right)_{III} = \left(\frac{d\bar{W}}{d\tau}\right)_{II} \frac{(\bar{W} - W_p)^k}{A + \beta(\bar{W} - W_p)^k}, \quad (19)$$

где  $A$ ,  $\beta$ ,  $k$  – экспериментальные коэффициенты;  $\bar{W}$ ,  $W_p$  – среднее текущее и равновесное влагосодержания частиц, соответственно, кг/кг.

Температура поверхности частицы в период прогрева (I)

$$T(R, \tau)_I = (\bar{T} + PT_M)(1 + P)^{-1}, \text{ где } P = \frac{Bi}{m+3} \cdot \frac{T_g - T_0}{T_M - T_0}, \quad (20)$$

что позволяет определить время перехода в период с постоянной скоростью сушки (II). Переход к третьему периоду определяется достижением частицей критического влагосодержания  $W_{кр}$  и условием

$$\left(\frac{d\bar{W}}{d\tau}\right)_{III} / \left(\frac{d\bar{W}}{d\tau}\right)_{II} = 1. \quad (21)$$

Из соотношений (19) и (21) следует зависимость для критического влагосодержания

$$W_{кр} = \bar{W} = W_p + \left(\frac{A}{1-\beta}\right)^{\frac{1}{k}}. \quad (22)$$

Равновесное влагосодержание частицы  $W_p$  можно определить по уравнению Ленгмюра:

$$W_p = [D - E(T_g - 273)] \cdot [\varphi / (F - \varphi)]^{0,5}, \quad (23)$$

где  $D$ ,  $E$  и  $F$  – постоянные, зависящие от вида топлива;  $\varphi$  – относительная влажность среды, %. При температуре окружающей среды, большей 373 К, принимают  $W_p = 0$ .

Для замыкания системы необходимо добавить уравнения движения частиц, теплового баланса, движения газа-теплоносителя и начальные условия.

В уравнении движения частиц учтены только силы аэродинамического сопротивления и гравитации. Отличие формы реальных частиц от шаровой учтено коэффициентом аэродинамического сопротивления.

Гранулометрическую характеристику исходного топлива представим в виде равных по массе (в сухом состоянии)  $i$  условных фракций частиц с приведенными (эквивалентными) размерами  $\delta_i$ . Расчет сушки строится следующим образом. В выбранном сечении тракта сравниваем среднее текущее влажосодержание  $\bar{W}_i$  с критическим  $W_{кр}$ . При  $\bar{W}_i < W_{кр}$  производные  $d\bar{T}_i/dL$  и  $d\bar{W}_i/dL$  определяем по формулам для III периода. Если же  $\bar{W}_i > W_{кр}$ , то сравниваем температуры  $T_i(R, \tau)$ , вычисленные по формуле (20), с температурой мокрого термометра  $T_m$ . Если  $T_i(R, \tau) < T_m$ , используем формулы I периода, в противном случае – II периода. Приведенные выше дифференциальные уравнения относительно неизвестных  $u_i$ ,  $\bar{T}_i$ ,  $\bar{W}_i$  и  $T_g$  интегрируются численными методами (предполагается, что в начальном сечении потока их значения известны). При этом учитывается изменение компонентного состава газа-теплоносителя, физических свойств ( $\lambda_i$ ,  $\lambda_g$ ,  $c_i$ ,  $c_g$ ,  $\nu$ ,  $\rho_i$ ,  $\rho_g$ ) фаз, а также, величин  $Re_i$ ,  $Nu_i$ ,  $Bi_i$  (соответственно чисел Рейнольдса, Нуссельта и Био для  $i$ -ой частицы) по координате  $L$ , поскольку  $u_i$ ,  $\bar{T}_i$ ,  $\bar{W}_i$  и  $T_g$  вычисляются для различных сечений. По достижении сечения  $B$  (мельницы) изменяем дисперсный состав твердой фазы (либо принимаем по опытным данным, либо определяем приведенным выше расчетом). В результате решения задачи получаем информацию о термообработке топлива вдоль тракта.

Для расчета сушки создана прикладная программа "DRYING" (на языке программирования Delphy) для персональных компьютеров с операционной системой Windows. Система уравнений, описывающая процессы тепло- и массообмена в сквозном двухфазном потоке, решается методом Рунге-Кутты.

В расчетах использованы данные промышленных экспериментов на ППС с М-В; результаты расчетов сопоставлены с экспериментом.

Расчет сушки в ППС с М-В 1600/600/980 при бесепараторном помоле башкирского бурого угля выполнен в диапазоне изменения производительности мельницы  $B_m = 4,2 \dots 9,9$  кг/с. Исходные данные изменялись в следующих пределах: влажность и крупность дробленки  $W_i^r = W_0 = \bar{W}_{i0} = 56,4 \dots 58,8$  %;

$R_5 = 35...48 \%$ ,  $R_{10} = 20...30 \%$ ,  $D_s = 8,9...13,5$  мм и  $D_{\max} \approx 50...60$  мм; крупность пыли  $R_{90} = 67...88 \%$ ,  $R_{1000} = 15...30 \%$ ,  $d_s = 0,59...1,03$  мм и  $d_{\max} \approx 4...6$  мм; расход и температура сушильного агента (продуктов сгорания) на входе в ППС, соответственно,  $g_{c.a1} = G_{g0} = 4,44...6,33$  кг/кг и  $T_{c.a1} = T_{g0} = 963...1042$  К.

Расчетные значения температуры сушильного агента на выходе из установки  $(T_{c.a2})_p$  отличались от опытных значений  $(T_{c.a2})_{оп} = 355...388$  К в пределах  $(-3...+24)$  К, соответствует относительному расхождению результатов  $(-0,8...+6,5)$  %. Расчетные значения средней влажности пыли  $W_p^{пл}$  отличалось от опытных значений  $W_{оп}^{пл} = 32,1...46,1$  % в пределах  $(+0,5...+3,2)$  %, что соответствует относительному расхождению результатов  $(+1,2...+10)$  %.

Расчет устройства нисходящей сушки ППС с М-В 1600/600/980 (с сепаратором) на чихезском, бикинском и березовском бурых углях выполнен с использованием опытных данных П.А. Иванова. В диапазоне производительности мельницы  $B_m = 2,7...6,8$  кг/с исходные данные изменялись в следующих пределах: гранулометрический состав топлива  $R_5 = 30...45 \%$ ,  $R_{10} = 12...18 \%$  и  $D_{\max} = 25...40$  мм, его влажность  $W_t^r = W_0 = \bar{W}_{i0} = 34,8...45,9$  % и температура  $T_0 = \bar{T}_{i0} = 293$  К; расход инертных газов  $G_{g0} = 5,73...8,17$  кг/с и их температура  $T_{c.a1} = T_{g0} = 963...1042$  К.

Опытные значения температуры сушильного агента в конце устройства нисходящей сушки изменялись в пределах  $(T_{c.a})_{оп} = 566...891$  К. Расчетные значения  $(T_{c.a})_p$  отличались от опытных в пределах  $(-9...+30)$  К, что соответствует относительному расхождению результатов  $(-1...+5)$  %.

Таким образом, предложенная методика значительно точнее существующих. Кроме того, численное моделирование позволяет описать процессы тепло- и массопереноса по тракту ППС, задает неравномерность термообработки топлива в сечениях, показывает, как влияет геометрия ППС и режимные параметры на эффективность сушки.

**Глава 4** посвящена разработке и внедрению новых технологических схем НТВ-сжигания различных топлив.

Многолетний опыт сжигания высоковлажных башкирских углей в прямом факеле в котлах ТП-14А (номинальной паропроизводительностью  $D_n = 61$  кг/с; с давлением острого пара  $p_{пе} = 9,8$  МПа и его температурой  $T_{пе} = 813$  К; тепловой мощностью  $Q_k = 153$  МВт) на Кумертауской ТЭЦ не решил главных проблем, связанных с ограничением производительности ППС с М-В, и, как следствие, снижением паровой нагрузки, потерей устойчивости воспламенения, ухудшением выгорания топлива. Подсветка факела газом (с

долей по тепловыделению до  $q_T = 0,5 \dots 0,7$ ) вызывала шлакование топки, что усугубляло недостатки эксплуатации.

Перевод котла ТП-14А на НТВ-сжигание заключался в реконструкции негазоплотной топки путем создания пережима фронтального экрана ( $b_{п.т}/b_T = 0,4$ ), перекрытия в плане устья топочной воронки и установки в нем СНД. Реконструкция четырех ППС с М-В 1600/600/980 выполнена путем демонтажа сепараторов, ПК, сбросных горелок, но с сохранением сушки топлива продуктами сгорания. Прямоточные пылегазовые горелки (4 шт.) установлены на нижней образующей пережима топки с наклоном вниз под углом  $45^\circ$ .

НТВ-сжигание обеспечило устойчивое горение высоковлажного топлива при нагрузках  $(0,5 \dots 1,0)D_n$  с проектными параметрами пара, что позволило отказаться от подсветки факела газом и устранило шлакование. За счет упрощения ППС и угрубления помола топлива сняты ограничения на производительность мельниц и обеспечена взрывобезопасность.

Однако неудачная конструкция горелок привела к росту среднерасходной скорости горелочных потоков до  $40 \dots 50$  м/с, что вызвало эрозионный износ заднего ската топочной воронки. Кроме того, на первом этапе НТВ-сжигания наблюдался повышенный недожог топлива  $q_4$  (до 3 %).

Анализ показал, что рециркуляция продуктов сгорания в схемах ППС с М-В влияет на топочный процесс и зависит от характеристик топлива. Так, например, повышение приведенной влажности  $W_{пр}^r$  башкирского угля с 5,5 до 7,2 кг·%/МДж увеличивает топливную нагрузку на одну ППС с 6,3 до 8,3 кг/с, при этом доля рециркуляции газов  $r_{пл}$  уменьшается на 20 %, а расчетная адиабатическая температура горения  $T_a$  снижается примерно на 80 К. Присадка к сушильному агенту горячего воздуха позволяет снизить присосы в ППС  $\Delta\alpha_{пл}$  и рециркуляцию  $r_{пл}$ , одновременно повысив  $T_a$ . При этом время пребывания частиц в прямоточной части факела увеличивается, что способствует снижению потерь с недожогом  $q_4$ .

Для повышения эффективности НТВ-сжигания башкирских углей и устранения износа топочных экранов на втором этапе реконструкции ППС были переведены в режим газовой сушки; изменена конструкция горелочных устройств.

Исследования (на обоих этапах) вихревого сжигания башкирских углей ( $W_i^r = 53 \dots 58$  %;  $A^r = 6,3 \dots 10$  %;  $Q_i^r = 8,1 \dots 9,6$  МДж/кг) проведены в диапазоне нагрузок  $(0,4 \dots 1,0)D_n$  без подсветки факела газом и при работе трех ППС. Характеристики пыли изменялись с ростом нагрузки в следующих пределах:  $W^{пл} = 25 \dots 45$  %,  $R_{1000} = 12 \dots 30$  % и  $R_{90} = 65 \dots 90$  %. Температура перегретого

пара поддерживалась в диапазоне  $T_{\text{пе}} = 803 \dots 818$  К. Тепловое напряжение ЗАГ  $q_{\text{v(ЗАГ)}}$  составляло  $235 \dots 535$  кВт/м<sup>3</sup>, а топки в целом  $q_{\text{v(Т)}} = 64 \dots 147$  кВт/м<sup>3</sup>.

Новая конструкция горелок позволила поддерживать среднерасходные скорости горелочного потока на уровне  $w_{\text{гор}} = 22 \dots 24$  м/с, что исключило эрозийный износ заднего ската топочной воронки. Оптимальное отношение суммарного горелочного импульса к общему импульсу потока нижнего дутья во всем диапазоне нагрузок котла составило в среднем 2,5, в то время как на первом этапе оно доходило до 3,2...4,5. Новый режим сушки позволил повысить долю первичного воздуха до  $r_{\text{пер}} > 0,6$ , что в сочетании с пониженными скоростями горелочных потоков улучшило воспламенение топлива и снизило потери  $q_4$  до 0,4...0,6 % (рис. 11), что находится в пределах нормативных значений.

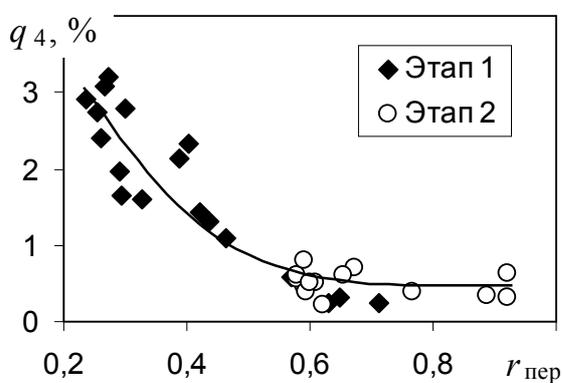


Рис. 11. Зависимость потерь с механическим недожогом от доли первичного воздуха в модернизированном котле ТП-14А-НТВ

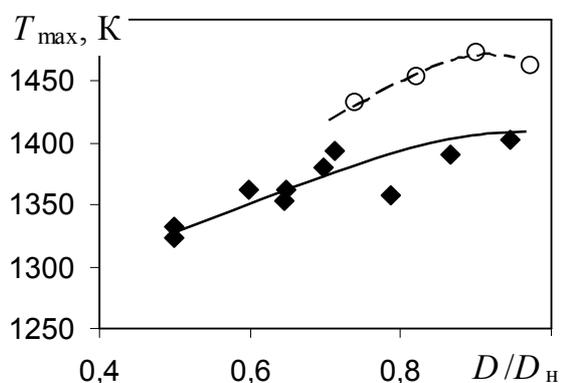


Рис. 12. Зависимость максимальной температуры в топке котла ТП-14А-НТВ от относительной нагрузки при газовой (♦) и газовоздушной (○) сушке

В режимах ППС с газовоздушной сушкой максимальная температура факела  $T_{\text{max}}$  примерно на 50...60 К выше, чем при газовой сушке (рис. 12), что согласуется с расчетными оценками  $T_a$ . Опытные значения температуры на выходе из топки при газовоздушной сушке оказались на 10...20 К ниже, чем при газовой сушке. Таким образом, при переходе с газовой сушки на газовоздушную тепловая эффективность работы топки несколько повышается. При нагрузках, близких к  $D_n$ , опытное значение коэффициента тепловой эффективности стен топки составило  $\psi_{\text{ср}} = 0,60 \pm 0,02$  (при параметре, характеризующем поле температуры,  $M = 0,48$ ).

Заметное снижение  $q_4$  на втором этапе работ позволило поднять (в диапазоне рабочих нагрузок котла) КПД (брутто) на 1...2 % и довести его до уровня  $\eta_{\text{к}} = 86 \dots 87,6$  % (рис. 13).

Усредненная концентрация  $\text{NO}_x$  в уходящих газах в диапазоне нагрузок  $(0,6...0,93)D_H$  изменялась в пределах  $150...275 \text{ мг/м}^3$  \*.

Общая наработка котла ТП-14А-НТВ к 2010 г. превысила 120 тыс. ч, в том числе после второго этапа работ – более 100 тыс. ч.

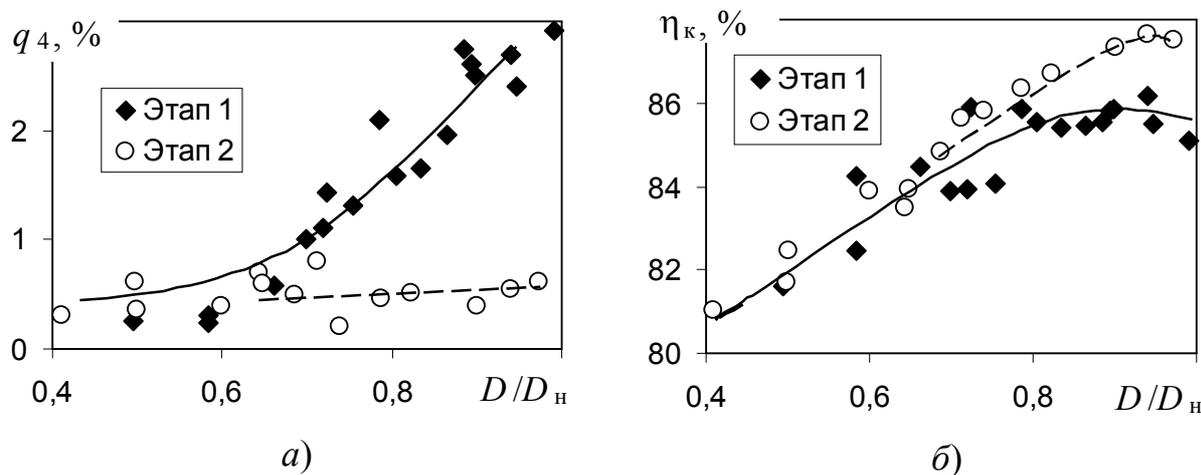


Рис. 13. Зависимость потерь  $q_4$  (а) и КПД (брутто)  $\eta_k$  (б) от относительной нагрузки котла ТП-14А-НТВ

По результатам вихревого сжигания башкирских углей на котле ТП-14А-НТВ было принято решение о разработке современного опытно-промышленного котла. По заявке Минэнерго в СПбГТУ совместно с АО "Красный котельщик" был разработан технический проект котла Е-220-9,8-НТВ для работы на высоковлажных бурых углях. Котел предназначен для замены морально и физически устаревшего оборудования при модернизации и расширении станции.

Для повышения эффективности НТВ-сжигания, надежности и ресурса оборудования разработаны и запатентованы новые технологические схемы и конструкции горелочно-сопловых устройств вихревых топков. Профиль полукруглой НТВ-топки (рис. 14) имеет два выступа: нижний 1 – для формирования вихревого движения в ЗАГ 3 и верхний 2 – для улучшения движения в прямооточной части факела 4. Новые конструкции прямооточных горелок "вписываются" в амбразуры, образованные экранными трубами. Повышена роль третичного дутья, которое позволяет регулировать топочный процесс в ЗАГ и в прямооточной части факела. В двухпоточных СНД 8 использован эффект инерционной сепарации частиц по классам с отведением эрозионно опасных мелких частиц топлива и золы в центральную область ЗАГ, что устраняет воздействие этих частиц на топочные экраны и уменьшает износ.

\* Здесь и далее значения концентрации  $\text{NO}_x$  приведены к нормальным условиям и концентрации  $\text{O}_2 = 6 \%$ .

Предложенные схемы и конструкции элементов НТВ-топки опробованы на действующем оборудовании, доказали свою надежность и обеспечили эффективное НТВ-сжигание низкорекреационных, высокочольных и сильношлакующих бурых углей, каменных углей, торфа и природного газа.

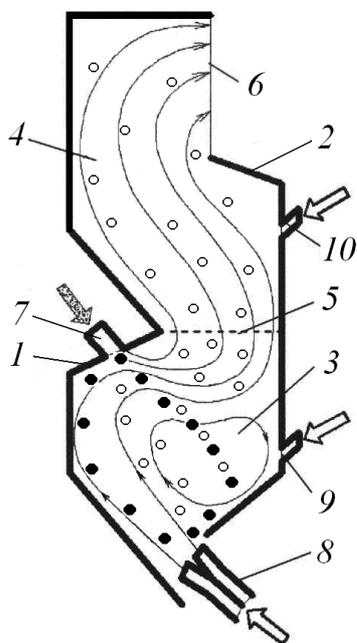


Рис. 14. Схема НТВ-топки полуоткрытого типа:  
 1, 2 – нижний и верхний выступы;  
 3 – вихревая ЗАГ;  
 4 – прямоочная часть факела;  
 5 – граница между ЗАГ и прямоочным факелом;  
 6 – выходное окно топки;  
 7 – пылеугольная горелка;  
 8 – СНД;  
 9, 10 – нижнее и верхнее третичное дутье;  
 ● – крупные частицы;  
 ○ – мелкие частицы;  
 ⇨ – топливовоздушная смесь;  
 ⇨ – воздух

Проекты модернизации котлов предусматривали комплексный подход: газоплотное исполнение вихревой топки полуоткрытого типа с "закрытым" устьем топочной воронки, с новыми схемами и конструкциями горелочно-сопловых устройств; улучшение (при необходимости) схемы водо-парового тракта; реконструкцию ППС (горловин бункеров, питателей, сепараторов) и др.

Основными задачами при модернизации котлов являлись:

- повышение надежности ППС, обеспечение бесперебойной подачи топлива, расширение регулировочного диапазона и увеличение производительности ППС;

- повышение устойчивости воспламенения и исключение подсветки пылеугольного факела резервным топливом (газом или мазутом);

- снижение загрязнения поверхностей нагрева и повышение бесшлаковочной мощности до номинальной;

- обеспечение высокой экономичности сжигания твердого топлива при изменении его теплотехнических характеристик в широких пределах;

- снижение вредных выбросов до нормативного уровня.

С серьезными проблемами столкнулись на ТЭЦ Бумажного комбината г. Инкоу (пров. Ляонин, КНР), где в котлах ВГ-65 ( $D_n = 18$  кг/с,  $p_{пе} = 3,8$  МПа и  $T_{пе} = 723$  К) сжигался местный низкосортный бурый уголь ( $W_i^r = 14...23$  %;  $A^r = 30...50$  %;  $Q_i^r = 5,6...14,0$  МДж/кг) с крайне низкой теплотой сгорания

летучих веществ (около 10,5 МДж/кг). Несмотря на тонкий помол в ШБМ и стабильную подачу топлива из пылевых бункеров в топку с угловым расположением горелок, обеспечить устойчивое горение не удавалось даже при подсветке факела мазутом (до  $q_m = 0,5$ ). Работа топки сопровождалась частыми хлопками, непрерывным шлакованием, нагрузка котла не превышала  $0,7D_n$ . Расход мазута на один котел достигал 4000...5000 т/год, что резко повышало себестоимость вырабатываемой энергии.

В 1992 г. в рамках программы, поддержанной Комитетом по энергетике КНР, реализован проект перевода котла ВГ-65 на НТВ-сжигание: тангенциальная топка заменена на вихревую полуоткрытого типа с фронтным расположением горелок, двухсопловой СНД и двумя ярусами третичного дутья; ППС с ШБМ заменена на ППС прямого вдувания с ММ.

В результате удалось обеспечить устойчивое воспламенение и горение низкосортного топлива и отказаться от подсветки факела мазутом. Максимальная безшлаковочная нагрузка котла повысилась с  $0,7D_n$  до  $1,15D_n$ . Возросла надежность работы оборудования, прекратились хлопки в топке. Затраты электроэнергии на подготовку топлива снизились с 40...60 до 5...6 кВт·ч/т. Угрубление помола обеспечило взрывобезопасную эксплуатацию ППС. Затраты на реконструкцию окупились в течение 8 месяцев работы котла.

В 2004 г. в рамках Программы технического перевооружения и реконструкции электростанций ОАО "Тулэнерго" реализован проект перевода котла БКЗ-220-9,8 ( $D_n = 61$  кг/с;  $p_{пе} = 9,8$  МПа;  $T_{пе} = 783$  К;  $Q_k = 152$  МВт) Новомосковской ГРЭС на НТВ-сжигание высокозольного, сильношлакующего подмосковного бурого угля, с обеспечением возможности работы на природном газе.

Комплексная модернизация котельной установки включала: замену топки на газоплотную конструкцию полуоткрытого типа (с пережимом фронтального экрана  $b_{п.т}/b_t = 0,4$ ) с установкой на нижней образующей пережима под углом  $45^\circ$  к горизонту 8 прямоточных пылеугольных горелок, с двухсопловой СНД, с двумя ярусами третичного дутья на тыльной стене топки; реконструкцию элементов ППС (питателей, сепараторов, пылепроводов). Для работы на газе помимо растопочных горелок встречно на боковых стенах топки по оси вихревой зоны установлены две газовые горелки фирмы ЗАО "Экотоп".

Реконструкция выходной части бункеров сырого угля и замена скребковых питателей на двухшнековые обеспечили надежную подачу топлива в мельницы. Угрубление помола (до  $R_{90} = 80...90$  %;  $R_{1000} = 9...21$  %;  $d_{max} = 5...10$  мм при  $W^{пл} = 13...24$  %) позволило повысить производительность ППС на 35 % и обеспечить взрывобезопасность.

При работе на угле ( $W^r = 26...31\%$ ;  $A^r = 35...41\%$ ;  $S^r = 2,8...3,2\%$ ;  $Q_i^r = 6,8...8,8$  МДж/кг) удалось отказаться от подсветки факела резервным топливом, поднять максимальную беспылаковую мощность котла с  $0,73D_n$  до  $1,0D_n$  (при которой  $q_{v(ЗАГ)} = 485$  кВт/м<sup>3</sup> и  $q_{v(Т)} = 160$  кВт/м<sup>3</sup>), обеспечить в рабочем диапазоне нагрузок  $(0,57...1,0)D_n$  необходимую температуру перегретого пара  $(785 \pm 5)$  К.

При нагрузках, близких к  $D_n$ , коэффициент тепловой эффективности составил  $\psi_{cp} = 0,52 \pm 0,02$  (при  $M = 0,48$ ).

КПД (брутто) котла (при исключении подсветки факела резервным топливом) повысился на  $2...4\%$  до уровня  $\eta_k = 89...91\%$ , при значениях  $q_4 = 1...1,5\%$  (ниже нормативных).

Существенно улучшились показатели котла по вредным выбросам: концентрация  $NO_x$  в уходящих газах составила  $200...250$  мг/м<sup>3</sup>, а  $CO$  – не более  $150$  мг/м<sup>3</sup>, что удовлетворяет современным нормативам; связывание  $SO_2$  в котле только за счет основных оксидов собственной золы топлива повысилось до  $40...45\%$ .

При работе на газе реализована схема многоступенчатого НТВ-сжигания, которая обеспечила: регулировочный диапазон нагрузок –  $(0,44...1,05)D_n$ ; КПД (брутто) котла  $\eta_k$  – до  $(94,5 \pm 0,5)\%$ ; выбросы  $NO_x$  – в пределах  $110...126$  мг/м<sup>3</sup> (при  $500...510$  мг/м<sup>3</sup> на соседних котлах).

Затраты на реконструкцию составили около  $20$  USD/кВт (в расчете на полезную тепловую мощность котла).

В 2006 г. при поддержке Администрации Алтайского края реализован пилотный проект модернизации котла БКЗ-85-1,3 ( $D_n = 23,6$  кг/с;  $p_{пе} = 1,3$  МПа;  $T_{пе} = 523$  К;  $Q_k = 60$  МВт) Южной тепловой станции в г. Рубцовске. Цель проекта – продление ресурса оборудования и освоение НТВ-сжигания кузнецких каменных углей.

До модернизации котел работал на угле марки СС, с подсветкой факела мазутом (до  $q_m = 0,6$ ), на нагрузках не выше  $0,65D_n$  при среднеэксплуатационном КПД (брутто) не более  $\eta_k = 70...75\%$  ( $q_4$  – до  $20\%$ ); концентрация  $NO_x$  достигала  $1500$  мг/м<sup>3</sup>. Подготовка топлива в ППС прямого вдувания с ММТ 1500/2510/735К, оснащенными центробежными сепараторами, осложнялась ненадежной работой скребковых питателей.

В ходе глубокой комплексной модернизации и капитального ремонта конвективной шахты заменены все поверхности нагрева котла. В вихревой газоплотной топке (с пережимом  $b_{п.т}/b_t = 0,36$ ) смонтировано 3 прямооточные горелки, двухсопловая СНД, два яруса третичного дутья. Совместно с ПК

"Сибэнергомаш" разработана оригинальная схема и конструкции поверхностей нагрева в горизонтальном газоплотном газоходе.

Общие затраты (включая капремонт) составили около 32 млн. руб.

Замена скребковых питателей на двухшнековые обеспечила стабильную работу ППС. Помол топлива можно было изменять в пределах от  $R_{90} = 9...10\%$  до  $R_{90} = 17...18\%$ .

В результате модернизации освоено вихревое сжигание кузнецких углей марок Т, СС, Г и Д с широким пределом изменения их теплотехнических характеристик:  $W_t^r = 9...19\%$ ;  $A^r = 15...30\%$ ;  $N^r = 1,5...1,6\%$ ;  $V^{daf} = 14...43\%$ ;  $Q_i^r = 17...23$  МДж/кг. Надежная работа ППС и устойчивое воспламенение позволили исключить подсветку факела мазутом.

На минимальной (по условиям горения) нагрузке  $0,3D_n$  (при  $q_{v(ЗАГ)} = 115$  кВт/м<sup>3</sup> и  $q_{v(Т)} = 55$  кВт/м<sup>3</sup>) максимальная температура факела в ЗАГ находилась на уровне  $(1423 \pm 50)$  К.

В рабочем диапазоне нагрузок  $(0,5...1,0)D_n$  оптимальный избыток воздуха на выходе из топки составил  $\alpha_T = 1,2...1,25$ . Температура перегретого пара  $(523...533$  К) удовлетворяла требованиям. Потери с механическим недожогом не превышали  $q_4 = 2,3...2,8\%$ ; КПД (брутто) котла составил  $\eta_k = 91,3...92,3\%$ . Концентрация  $NO_x$  в уходящих газах возрасла с нагрузкой и изменялась в пределах  $250...420$  мг/м<sup>3</sup>, что ниже нормативных значений  $(470$  мг/м<sup>3</sup>).

Установлено, что максимальная бешлаковочная нагрузка котла равна  $1,0D_n$  (при  $q_{v(ЗАГ)} = 375$  кВт/м<sup>3</sup> и  $q_{v(Т)} = 174$  кВт/м<sup>3</sup>) для кузнецких углей марок Г (Д) и  $1,2D_n$  (при  $q_{v(ЗАГ)} = 450$  кВт/м<sup>3</sup> и  $q_{v(Т)} = 210$  кВт/м<sup>3</sup>) – для углей марок Т и СС.

При нагрузках, близких к  $D_n$ , коэффициент тепловой эффективности составил  $\psi_{cp} = 0,57 \pm 0,02$  (при  $M = 0,48$ ).

К лету 2010 г. котел отработал более 16 тыс. ч. В 2008 г. на НТВ-сжигание переведен второй котел станции, а на 2011 г. запланирована модернизация третьего котла.

Положительные результаты НТВ-сжигания различных топлив позволили обосновать технологические решения для многотопливного котла.

В 2008 г. на Кировской ТЭЦ-4 реализован проект модернизации котла БКЗ-210-13,8 ( $D_n = 58,3$  кг/с;  $p_{пе} = 13,8$  МПа;  $T_{пе} = 813$  К;  $Q_k = 143$  МВт) для отдельного НТВ-сжигания кузнецких каменных углей (Г, Д), фрезерного торфа и природного газа в одной топке.

Цель модернизации – продление ресурса оборудования, обеспечение номинальной нагрузки котла на торфе и повышение максимальной нагрузки до

$1,2D_H$  (69,5 кг/с) при работе на угле и газе с высокой эффективностью сжигания топлива и низкими вредными выбросами.

Проект предусматривал газоплотную вихревую топку полуоткрытого типа (с долей пережима 0,4), оснащенную 6 прямоточными пылевыми горелками (заведенными во фронтальной аэродинамической выступ с наклоном вниз под углом  $45^\circ$ ), двухсопловой СНД, тремя ярусами третичного дутья, расположенными на тыльной стене топки; на боковых стенах установлены в два яруса четыре низкоэмиссионные газомазутные горелки фирмы ЗАО "Экотоп". Для улучшения регулировочной характеристики пароперегревателя увеличена поверхность его радиационной ступени (за счет сокращения части испарительного фронтального экрана). Для раздельной работы на угле и торфе разработана (с использованием численного моделирования) уникальная конструкция двухпоточного (инерционно-прямоточного) сепаратора. Скребок питатели сырого топлива заменены на двухступенчатые двухшнековые с частотным регулированием привода.

В результате реконструкции обеспечена надежная работа ППС на торфе (в режиме прямоточного сепаратора) и угле (в режиме инерционного сепаратора). Внедрение двухступенчатых двухшнековых питателей полностью устранило зависание топлива в бункерах и замазывание питателей, стабилизировало работу ППС в рабочем диапазоне нагрузок. Твердые топлива сжигались без подсветки факела газом или мазутом; шлакование отсутствовало. Параметры пара поддерживались в допустимых пределах.

При работе на торфе ( $W^r = 45 \dots 60 \%$ ;  $A^r = 5 \dots 10 \%$ ;  $N^r = 0,9 \dots 1,1 \%$ ;  $Q_i^r = 6,6 \dots 8,8$  МДж/кг) в диапазоне нагрузок  $(0,65 \dots 1,0)D_H$  оптимальный избыток воздуха на выходе из топки  $\alpha_T$  составил  $1,3 \dots 1,35$ . На номинальной нагрузке при работе трех ППС механический недожог ( $q_4 = 0,95 \%$ ) находился в нормативных пределах, КПД (брутто) котла –  $\eta_k = 90,5 \%$ , а концентрация  $NO_x$  не превышала  $550$  мг/м<sup>3</sup> (этот показатель при работе на торфе не нормируется). Температура факела в ЗАГ находилась в пределах  $1273 \dots 1373$  К. На пониженной нагрузке (до  $0,65D_H$ ) с переходом на две ППС недожог топлива возрос до  $q_4 = 2,1 \%$ ; КПД (брутто) котла при этом снизился незначительно: до  $\eta_k = 89,9 \%$ .

На каменном угле ( $W^r = 12 \dots 22 \%$ ;  $A^r = 10 \dots 16 \%$ ;  $S^r = 0,2 \dots 0,4 \%$ ;  $N^r = 1,5 \dots 1,8 \%$ ;  $V^{daf} = 41 \dots 45 \%$ ;  $Q_i^r = 18 \dots 23$  МДж/кг) угрубленного помола (до  $R_{90} = 60 \dots 80 \%$ ) на двух ППС обеспечена работа котла в диапазоне нагрузок  $(0,65 \dots 1,2)D_H$ ; оптимальный избыток воздуха на выходе из топки  $\alpha_T$  составил  $1,2 \dots 1,25$ .

На номинальной нагрузке механический недожог соответствовал нормативному значению ( $q_4 = 1,5 \%$ ) при КПД (брутто) котла  $\eta_k = 92 \%$ , а концен-

трация  $\text{NO}_x$  не превышала  $450 \text{ мг/м}^3$ , что ниже нормативных ограничений. Температура факела в ЗАГ находилась в пределах  $1473 \dots 1573 \text{ К}$ ; максимум температуры располагался в центральной области ЗАГ. Коэффициент тепловой эффективности составил  $\psi_{\text{ср}} = 0,55 \pm 0,02$  (при  $M = 0,48$ ).

На максимальной нагрузке  $1,2D_{\text{н}}$  (при  $q_{\text{v(ЗАГ)}} = 500 \text{ кВт/м}^3$  и  $q_{\text{v(т)}} = 175 \text{ кВт/м}^3$ ) получено снижение механического недожога топлива до  $q_4 = 1,3 \%$ . При этом за счет увеличения температуры уходящих газов (и роста тепловых потерь) КПД (брутто) котла понизился до  $\eta_{\text{к}} = 91 \%$ , а концентрация  $\text{NO}_x$  возросла до  $500 \text{ мг/м}^3$ , что превышает норматив.

На природном газе при оптимальном избытке воздуха на выходе из топки ( $\alpha_{\text{т}} = 1,03 \dots 1,05$ ) регулировочный диапазон нагрузок составил  $(0,57 \dots 1,2)D_{\text{н}}$ , а КПД (брутто) котла –  $\eta_{\text{к}} = (95 \pm 0,1) \%$ . Ступенчатое вихревое сжигание газа с использованием низкоэмиссионных горелок позволило обеспечить низкие (в пределах норматива) выбросы  $\text{NO}_x$ : на уровне  $110 \dots 115 \text{ мг/нм}^3$  при нагрузках  $(0,57 \dots 1,0)D_{\text{н}}$  и до  $125 \text{ мг/нм}^3$  при нагрузке  $1,2D_{\text{н}}$ .

Сравнительные показатели котла БКЗ-210-13,8 до и после модернизации при работе на различных видах топлива приведены в таблице.

Сравнительные показатели котла БКЗ-210-13,8 до и после модернизации

Показатель	Фрезерный торф		Кузнецкий уголь		Природный газ	
	до	после	до	после	до	после
Максимальная паропроизводительность $D_{\text{max}}$ , кг/с	50*	58,3	51,4	69,5	58,3	69,5
Потери с уходящими газами $q_2$ , %	9,9*	8,0	8,2	7,2	6,5	4,4
Потери с мех. недожогом $q_4$ , %	3,0*	0,95	11,5	1,3	–	–
КПД (брутто) котла $\eta_{\text{к}}$ , %	86,4*	90,5	79,6	91,0	92,9	95,1
Выбросы $\text{NO}_x$ , $\text{мг/м}^3$	700*	550	1500	500	370	125

\* При подсветке факела резервным топливом

По итогам освоения НТВ-сжигания на Кировской ТЭЦ-4 ОАО "ТГК-5" принята программа технического перевооружения станции, которой предусмотрена модернизация еще четырех котлов.

Таким образом, на основе предложенных в диссертации инновационных решений разработаны новые технологические схемы НТВ-сжигания, реализация которых при комплексной модернизации котлов разной мощности позволила обеспечить эффективное сжигание подмосковного бурого угля, кузнецких каменных углей марок Т, СС, Г и Д, фрезерного торфа, отказаться от подсветки факела резервным топливом, устранить эрозионный износ и шлакова-

ние топок, снизить вредные выбросы. Отработанные технологические и конструктивные решения можно использовать при создании новых унифицированных по топливу котлов с НТВ-сжиганием.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Установлено, что сложности, отмечавшиеся на первых этапах освоения НТВ-сжигания (эрозионный износ топочных поверхностей нагрева, повышенные потери теплоты с механическим недожогом топлива), были обусловлены недостатками технологических схем и конструкций горелочно-сопловых устройств НТВ-топок, а также существенным превышением проектной крупности топлива.

Показано, что нормативная и другие известные эмпирические методики непригодны для расчета размола и сушки топлива в случае упрощенных (без сепаратора) ППС с быстроходными мельницами.

2. На основе измельчения бурых и каменных углей в лабораторных установках методами истирания, раздавливания и удара (воздушно-сухого топлива), в стендовых установках с моделями быстроходных мельниц (воздушно-сухого и влажного топлива) и в промышленных ППС с быстроходными мельницами без сепараторов экспериментально подтвержден закон Риттингера.

3. Установлено, что кратность измельчения топлива изменяется прямо пропорционально его исходной крупности в диапазоне от 1,5 до 250. Коэффициент пропорциональности – показатель измельчения по Риттингеру – зависит от конструкции измельчителя, размолоспособности топлива и удельной энергии, затраченной на размол. С ростом топливной нагрузки в промышленных мельницах кратность измельчения снижается. Соотношение  $\mathcal{E}_{\text{общ}}/P_R$  является величиной постоянной и равной коэффициенту Риттингера  $k_R$  для всех исследованных топлив.

4. Для характеристики сопротивляемости топлива размолу предложен относительный коэффициент измельчаемости  $K_G$ , который связан с известным коэффициентом  $K_{\text{до}}$  зависимостью  $K_G \cong (K_{\text{до}})^{1,4}$ .

5. Влажность топлива снижает интенсивность его измельчения в мельнице не более, чем на 10 %.

6. Максимальная производительность бессепараторных ППС с М-В по топливу ограничена условиями пневмотранспорта (при наличии ПК) и условиями сушки (при отсутствии ПК).

7. Наибольшее влияние на тонину помола при однократном цикле размола бурых углей в ММ без сепаратора оказывает крупность исходного топлива, а не вентиляция мельницы, как предполагалось ранее.

8. Расчет производительности упрощенной ППС с быстроходной мельницей, выполненный на основе закона Риттингера, обеспечивает сходимость с опытными данными в пределах  $\pm 15\%$ .

9. Предложенный в работе расчет сушки топлива в тракте упрощенной ППС с быстроходной мельницей адекватно отражает физику процесса, обеспечивает сходимость с опытными данными в пределах  $\pm 10\%$ , позволяет выявить особенности тепло- и массопереноса по длине тракта ППС, дает представление о неравномерности термообработки материала по тракту, влиянии геометрии тракта и режимных параметров на эффективность сушки.

10. Новые технологические схемы ППС и НТВ-топок позволили повысить эффективность сжигания торфа, бурых и каменных углей, исключить эрозионный износ и шлакование топки, расширить рабочий диапазон нагрузок котла, отказаться от подсветки факела газом или мазутом и обеспечить вредные выбросы в пределах нормативных значений. Эти же топки позволяют эффективно сжигать природный газ с нормативными значениями  $\text{NO}_x$ .

11. Отработана схема комплексной модернизации котельных установок, позволяющая продлить их ресурс на 15...20 лет и обеспечить гарантированную выработку установленной мощности с высокими экономическими показателями и нормативными вредными выбросами. Стоимость модернизации на порядок дешевле нового строительства, а срок окупаемости составляет в среднем 2...4 года.

12. Отработанные технологические и конструктивные решения могут использоваться при создании новых котлов с НТВ-сжиганием.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

**Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК**

1. Повышение эффективности работы котла ТП-14А при сжигании высоковлажных бурых углей / Ю.А. Рундыгин, В.Е. Скудицкий, К.А. Григорьев [и др.] // Энергетик. 1988. № 9. С. 14–15.
2. Исследование подготовки топлива для низкотемпературного вихревого сжигания / К.А. Григорьев, Ю.А. Рундыгин, Ф.З. Финкер [и др.] // Теплоэнергетика. 1988. № 11. С. 66–68.
3. Рундыгин, Ю.А. Проблемы использования местных топливных ресурсов для энергообеспечения Северо-Западного региона / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 1998. №4 (12). С. 64–68.
4. Экологические характеристики котла ТП-14А, реконструированного на низкотемпературное вихревое сжигание бурого угля / Р.М. Фаткуллин, А.А. Пискунов, К.А. Григорьев [и др.] // Электрические станции. 2000. № 5. С. 18–22.
5. Ольховский, А.О. Математическое моделирование процесса сушки топлива в пылесистемах с быстроходными мельницами / А.О. Ольховский, К.А. Григорьев // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2000. № 4 (22). С. 119–122.

6. Опыт применения вихревой низкотемпературной технологии сжигания на котле БКЗ-220-100 / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Р.Г. Аношин [и др.] // Энергетик. 2009. № 1. С. 24–26.
7. Опыт низкотемпературного вихревого сжигания различных видов топлива в котле БКЗ-210-13,8 Кировской ТЭЦ-4 / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Ю.В. Зыкин [и др.] // Электрические станции. 2010. № 4. С. 9–13.– Пер. ст.: Low-temperature swirl combustion of different kinds of fuel in a BKZ-210-13.8 boiler at the Kirov TETs-4 heating and electric power plant / К.А. Grigor'ev, V.E. Skuditskii, Yu.V. Zykin [et al] // Power Technology and Engineering. Vol. 44. № 3. P. 227–230.
8. Григорьев, К.А. Закономерности измельчения топлива в мельницах: теория и эксперимент / К.А. Григорьев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 4 (110). С. 58–66.

#### **Патенты**

9. Пат. 2044218 РФ. Способ сжигания топлива и вихревая камера сгорания / Ю.А. Рундыгин, Г.В. Альфимов, К.А. Григорьев [и др.]. – Оpubл. 20.09.95. Бюл. № 26.
10. Пат. 2253799 РФ. Вихревая топка / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Ю.А. Рундыгин [и др.]. – Оpubл. 10.06.05. Бюл. № 16.
11. Пат. 2253800 РФ. Вихревая топка / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Ю.А. Рундыгин [и др.]. – Оpubл. 10.06.05. Бюл. № 16.
12. Пат. 2253801 РФ. Вихревая топка / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Ю.А. Рундыгин [и др.]. – Оpubл. 10.06.05. Бюл. № 16.
13. Пат. 008689 Евразийский. Вихревая топка / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Ю.А. Рундыгин [и др.]. – Оpubл. 29.06.07. Бюл. № 3.
14. Пат. 008690 Евразийский. Вихревая топка / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Ю.А. Рундыгин [и др.]. – Оpubл. 29.06.07. Бюл. № 3.
15. Пат. 008691 Евразийский. Вихревая топка / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Ю.А. Рундыгин [и др.]. – Оpubл. 29.06.07. Бюл. № 3.
16. Пат. 83759 Украина. Вихревая топка / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Ю.А. Рундыгин [и др.]. – Оpubл. 11.08.08. Бюл. № 15.
17. Пат. 83760 Украина. Вихревая топка / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Ю.А. Рундыгин [и др.]. – Оpubл. 11.08.08. Бюл. № 15.
18. Пат. 83761 Украина. Вихревая топка / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Ю.А. Рундыгин [и др.]. – Оpubл. 11.08.08. Бюл. № 15.

#### **Статьи в трудах, материалах международных и всероссийских конференций, в сборниках научных трудов**

19. Рундыгин, Ю.А. Исследование процесса сушки высоковлажных бурых углей в аэрофонтанной сушилке / Ю.А. Рундыгин, В.Е. Скудицкий, А.Ю. Егоров, К.А. Григорьев // Повышение эффективности энергетического оборудования.– Л., 1986.– С. 20–24.– (Тр. ЛПИ; № 420).
20. Основные принципы модернизации котельного оборудования на основе низкотемпературного вихревого сжигания высокозабалластированных твердых топлив / Ю.А. Рундыгин, И.А. Щучкин, К.А. Григорьев [и др.]. // Всесоюз. науч.-техн. совещ. "Вопросы создания котельного оборудования для модернизации электростанций" (Ростов-на-Дону, окт. 1990 г.): Тез. докл. Л., 1990.– С. 6–13.
21. Энергетическое использование местных низкосортных топлив с применением низкотемпературной вихревой технологии сжигания / Ю.А. Рундыгин,

- Г.В. Альфимов, К.А. Григорьев [и др.]. // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч. тр. / СПбГТУ РП.– СПб., 1995.– Ч. 1.– С. 68–86.
22. The Solution of Regional Power and Ecology Problems Based on the New Low-Temperature Vortex-Type Technology for Solid Fuel Combustion / Yu.A. Rundygin, G.V. Alfimov, K.A. Grigoriev [et al.]. // Energy and Environment: Proc. of the Int. Conf. on Energy and Environment, Shanghai, China, May 1995.– New York: Begell House, 1996.– P. 631–638.
23. Possibilities of Deeper Desulfurization of Flue Gases by Oil Shale Ash Components in Different Burning Technologies / Yu. Rundygin, G. Alfimov, K. Grigoryev [et al.]. // Oil Shale. 1997. Vol. 14, № 2.– P. 115–131.
24. Снижение вредных выбросов на котельных агрегатах, сжигающих сланцы / Ю.А. Рундыгин, Г.В. Альфимов, К.А. Григорьев [и др.]. // Энергетические машины и установки.– СПб., 1997.– С. 38–39.– (Тр. СПбГТУ; № 465).
25. Григорьев, К.А. О нормативной методике расчета пылесистем с мельницей-вентилятором / К.А. Григорьев, О.В. Малярова // Современные научные школы: перспективы развития.– СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. Ч. 1.– С. 118–120.
26. Рундыгин, Ю.А. Проблемы создания топочно-оборудования для использования местных топливных ресурсов / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч. тр. / СПбГТУРП.– СПб., 1999.– С. 104–111.
27. Roundyguine, Y.A. Use of Oil Shale Waste Ash for Flue Gas Desulphurization / Y.A. Roundyguine, G.V. Alfimov, K.A. Grigoryev // Proc. of the 4th Int. Symp. on Coal Combustion, eds. Xu-Chang Xu, Hai-Ying Qi, Bao-Guo Fan, August 18–21, 1999, Beijing, P.R.China, P. 171–176.
28. Рундыгин, Ю.А. Решение проблем энергетического использования низкосортных топлив на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий // Мат. зональн. совещ. по вопросам сжигания местных низкосортных углей (Владивосток, 21–22 июля 1999 г.).– Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 1999.– С. 38–46.
29. Рундыгин, Ю.А. Влияние схемы подготовки топлива на эффективность низкотемпературного вихревого сжигания башкирских углей / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, А.Ю. Егоров // Энергетические машины и установки.– СПб., 1999.– С. 46–51.– (Тр. СПбГТУ; № 481).
30. Рундыгин, Ю.А. Низкотемпературные топки для энергетического использования растительных биомасс / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, С.М. Шестаков // Информационные бизнес-технологии XXI века: Тр. Бизнес-Форума.– СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.– С. 105–107.
31. Рундыгин, Ю.А. Внедрение технологии низкотемпературного вихревого сжигания при модернизации котельных установок / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий // Новые технологии эффективного использования топлива, модернизации и ремонта котельных установок: Мат. семинара.– СПб.: Изд-во ПЭ-ИПК, 2000.– С. 38–47.
32. Рундыгин, Ю.А. Модернизация и восстановительные ремонты энергетического оборудования в современных условиях / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев // Но-

- вые технологии эффективного использования топлива, модернизации и ремонта котельных установок: Мат. семинара. СПб.: Изд-во ПЭИПК, 2000. С. 81–85.
33. Рундыгин, Ю.А. Опыт применения НТВ технологии сжигания твердых топлив и предложения по ее использованию на электростанциях АО "Свердловэнерго" / Ю.А. Рундыгин, В.Е. Скудицкий, К.А. Григорьев // Сб. докл. расширенного НТС АО "Свердловэнерго" "Повышение надежности топливообеспечения ТЭС АО "Свердловэнерго" в условиях ограничения использования природного газа и мазута. Перспективы внедрения новых технологий сжигания твердого топлива, варианты реконструкции и модернизации ТЭС" (Среднеуральск, 6–8 июня, 2000 г.).– Екатеринбург: АО "Свердловэнерго", 2000.– С. 94–101.
34. Рундыгин, Ю.А. Модернизация котлов на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания твердых топлив / Ю.А. Рундыгин, В.Е. Скудицкий, К.А. Григорьев, А.П. Токунов // Энергетика: экономика, технологии, экология.– 2000, № 4.– С. 19–22.
35. Рундыгин, Ю.А. Низкотемпературная вихревая технология сжигания твердых топлив: опыт внедрения, перспективы использования / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий // Всерос. науч.-технич. семинар "Новые технологии сжигания твердого топлива: их текущее состояние и использование в будущем" (Москва, 23–24 янв. 2001 г.): Сб. докл.– М.: ВТИ, 2001.– С. 286–295.
36. Рундыгин, Ю.А. Опыт освоения и совершенствования энергетического использования древесных отходов на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч. тр. / СПб ГТУ РП.– СПб., 2001.– С. 131–145.
37. Рундыгин, Ю.А. Шлакование и загрязнение поверхностей нагрева котлов при низкотемпературном сжигании сланцев / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев // Сб. докл. третьей науч.-практ. конф. "Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов" (Челябинск, 19–21 июня 2001 г.).– Челябинск: УралВТИ, 2001.– Т. I.– С. 191–198.
38. Применение технологии низкотемпературного вихревого сжигания при модернизации котельных установок / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий [и др.] // Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий: Мат. науч.-практ. конф. и школы семинара (Санкт-Петербург, 14–16 июня 2003). СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.– С. 216–222.
39. Снижение выбросов вредных веществ при организации сжигания твердых топлив по низкотемпературной вихревой технологии / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий [и др.] // Сб. докл. тематич. семинара "Экология в энергетике–2004".– М.: ВВЦ, 2004.– С. 108–109.
40. Рундыгин, Ю.А. Совершенствование технологии низкотемпературного вихревого сжигания топлива и перспективы модернизации котельных установок / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий // Энергомашиностроение.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004.– С. 128–135.– (Тр. СПбГПУ; № 491).
41. Модернизация пылеугольных котлов на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий [и др.] // Сб. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. "Достижения и перспективы развития энергетики Сибири" (Красноярск, 20–21 октября 2005 г.). Красноярск: Изд-во СибВТИ, 2005.– С. 144–147.

42. Опыт сжигания подмосковного угля и природного газа в низкотемпературной вихревой топке котла БКЗ-220-100 / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий [и др.]. // Мат. докл. нац. конф. по теплоэнергетике НКТЭ-2006 (Казань, 4–8 сентября 2006 г.). Казань: Иссл. центр пробл. энерг. КазНЦ РАН, 2006. Т. II.– С. 93–96.
43. Аношин, Р.Г. Анализ нормативного метода расчета пылесистем с быстроходными мельницами / Р.Г. Аношин, К.А. Григорьев // Мат. докл. V школы-семинара молодых ученых и специалистов акад. РАН В.Е. Алемасова "Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении" (Казань, 3–9 сентября 2006 г.). Казань: Иссл. центр пробл. энерг. КазНЦ РАН, 2006.– С. 160–164.
44. Григорьев, К.А. Низкотемпературная вихревая технология сжигания: опыт внедрения, перспективы использования / К.А. Григорьев, Ю.А. Рундыгин, В.Е. Скудицкий, С.М. Шестаков // Виктор Владимирович Померанцев. К 100-летию со дня рождения: Сборник воспоминаний и научных статей / Отв. ред. Ю.А. Рундыгин.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.– С. 133–149.
45. Модернизация котельной техники на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания твердых топлив / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий [и др.]. // Повышение эффективности производства и использования энергии на Дальнем Востоке: Мат. IV семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике.– Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006.– С. 83–89.
46. Модернизация котла ТП-35у для вихревого сжигания гидролизного лигнина / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий [и др.]. // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч. тр. / СПб ГТУ РП.– СПб., 2006.– С. 80–84.
47. Математическое моделирование топочных процессов при сжигании грубоизмельченного топлива / Р.Г. Аношин, А.В. Гиль, К.А. Григорьев [и др.]. // Горение твердого топлива: Сб. докл. VI Всерос. конф. (Новосибирск, 8–10 ноября 2006 г.). Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006.– Ч. I.– С. 74–80.
48. Численное исследование аэротермохимических процессов при различных схемах сжигания подмосковного угля в топке котла БКЗ-220 / Р.Г. Аношин, К.А. Григорьев, Д.Н. Михайлов [и др.]. // Горение твердого топлива: Сб. докл. VI Всерос. конф. (Новосибирск, 8–10 ноября 2006 г.).– Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006.– Ч. I.– С. 81–87.
49. Григорьев, К.А. Метод расчета суммарного теплообмена в низкотемпературных вихревых топках / К.А. Григорьев // Горение твердого топлива: Сб. докл. VI Всерос. конф. (Новосибирск, 8–10 ноября 2006 г.).– Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006.– Ч. I.– С. 143–146.
50. Математическое моделирование топочных процессов при сжигании грубоизмельченного топлива / Р.Г. Аношин, А.В. Гиль, К.А. Григорьев [и др.]. // Горение и плазмохимия. 2006. Т. 4. № 4.– С. 255–259.
51. Разработка многотопливных топков на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания / Р.Г. Аношин, Ф.Р. Валиев, К.А. Григорьев [и др.]. // Сб. докл. IV науч.-практич. конф. "Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов" (Челябинск, 4–7 июня 2007 г.).– Челябинск: ЧФ ПЭИпк, 2007. Т. II.– С. 110–115.
52. Опыт ступенчато-вихревого сжигания кузнецкого каменного угля / Р.Г. Аношин, Ф.Р. Валиев, К.А. Григорьев [и др.]. // Сб. докл. IV науч.-практич.

- конф. "Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов" (Челябинск, 4–7 июня 2007 г.).– Челябинск: ЧФ ПЭИпк, 2007. Т. II. С. 116–121.
53. Опыт низкотемпературного вихревого сжигания различных топлив в котле БКЗ-210-13,8 / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, Р.Г. Аношин [и др.]. // Сб. докл. Междунар. науч.-технич. конф. "Технологии эффективного и экологически чистого использования угля" (Москва, 29–30 октября 2009).– М.: ОАО "ВТИ", 2009.– С. 376–383.
54. Скудицкий, В.Е. Комплексная модернизация пылеугольных котлов на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания / В.Е. Скудицкий, К.А. Григорьев, Р.Г. Аношин, В.В. Османов // Горение твердого топлива: Сб. докл. VII Всерос. конф. с междунар. участием (Новосибирск, 10–13 ноября 2009 г.).– Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2009.– Ч. 2.– С. 150–156.
55. Григорьев, К.А. Совершенствование метода расчета размольной производительности быстроходных мельниц / К.А. Григорьев, Р.С. Тарасенко // Горение твердого топлива: Сб. докл. VII Всерос. конф. с междунар. участием (Новосибирск, 10–13 ноября 2009 г.).– Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2009.– Ч. 3.– С. 124–130.
56. Валиев, Ф.Р. Результаты вихревого сжигания кузнецких каменных углей в котле БКЗ-85 / Ф.Р. Валиев, К.А. Григорьев // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Мат. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. III. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 38–40.
57. Османов, В.В. Градиентная теплотметрия в вихревой топке модернизированного котла БКЗ-210 / В.В. Османов, К.А. Григорьев, А.В. Митяков // Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Мат. докл. VII школы-семинара молодых ученых и специалистов акад. РАН В.Е. Алемасова (Казань, 15–17 сентября 2010 г.).– Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2010.– С. 277–280.
58. Скудицкий, В.Е. Комплексная модернизация пылеугольных котлов на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания / В.Е. Скудицкий, К.А. Григорьев, Р.Г. Аношин, В.В. Османов // Энергосбережение и энергоэффективность экономики Кузбасса. 2010, август.– С. 31–34.
59. Опыт низкотемпературного вихревого сжигания различных топлив в котле БКЗ-210-13,8 Кировской ТЭЦ-4 и возможность его использования на Балканах / К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий, С.В. Джекич [и др.]. // Мат. междунар. конф. Power Plants 2010 (Сербия, Врнячка Баня, 26–29 октября 2010 г.). CD. <http://e2010.drustvo-termicara.com/> (рус. и серб.)
60. Григорьев, К.А. Технология сжигания органических топлив. Энергетические топлива: Учеб. пособие / К.А. Григорьев, Ю.А. Рундыгин, А.А. Тринченко.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.– 92 с.