

---

**М О Н О Г Р А Ф И И    Н Г Т У**

---

**Ю. В. ОВЧИННИКОВ, Е. Е. БОЙКО**

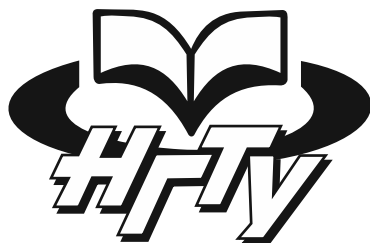
**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
И ИССЛЕДОВАНИЯ  
ТОНКОДИСПЕРСНЫХ  
ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ**



# Монографии НГТУ

---

Серия основана в 2004 году



## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ «МОНОГРАФИИ НГТУ»**

д-р техн. наук, проф. (председатель) *А.А. Батаев*  
д-р техн. наук, проф. (зам. председателя) *А.Г. Вострецов*  
д-р техн. наук, проф. (отв. секретарь) *В.Н. Васюков*

д-р техн. наук, проф. *А.А. Воевода*  
д-р техн. наук, проф. *В.И. Денисов*  
д-р физ.-мат. наук, проф. *А.К. Дмитриев*  
д-р физ.-мат. наук, проф. *В.Г. Дубровский*  
д-р филос. наук, проф. *В.И. Игнатьев*  
д-р филос. наук, проф. *В.В. Крюков*  
д-р соц. наук, проф. *Л.А. Осьмук*  
д-р техн. наук, проф. *Н.В. Пустовой*  
д-р техн. наук, проф. *Г.И. Расторгуев*  
д-р физ.-мат. наук, проф. *В.А. Селезнев*  
д-р техн. наук, проф. *Ю.Г. Соловейчик*  
д-р техн. наук, проф. *А.А. Спектор*  
д-р техн. наук, проф. *А.Г. Фишов*  
д-р экон. наук, проф. *М.В. Хайруллина*  
д-р техн. наук, проф. *В.А. Хрусталев*  
д-р техн. наук, проф. *А.Ф. Шевченко*

**Ю. В. ОВЧИННИКОВ, Е. Е. БОЙКО**

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
И ИССЛЕДОВАНИЯ  
ТОНКОДИСПЕРСНЫХ  
ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ**



**НОВОСИБИРСК  
2 0 1 7**

УДК 662.75-032.35  
О-355

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *С.Л. Елистратов*  
д-р техн. наук *Л.А. Огуречников*

**Овчинников Ю.В.**

О-355 Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий : монография / Ю.В. Овчинников, Е.Е. Бойко. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – 308 с. (серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-3119-1

Монография посвящена новым технологиям углепереработки, безопасным в пожарном и экологическом смысле, в частности водоугольным суспензиям (ВУС). Предложена новая технология производства ВУС, основанная на использовании современных аппаратов, не применяемых ранее.

Все полученные результаты подтверждены экспериментально на установках в Академгородке.

УДК 662.75-032.35

ISBN 978-5-7782-3119-1

© Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е., 2017  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2017

**YU. V. OVCHINNIKOV, E. E. BOIKO**

**THE TECHNOLOGY OF OBTAINING  
AND STUDYING FINE-DISPERSED  
COAL-WATER SLURRY**



**NOVOSIBIRSK**

**2 0 1 7**

УДК 662.75-032.35  
О-355

Reviewers:

Prof. *S.L. Elistratov*, D. Sc. (Eng.)

*L.A. Ogurechnikov*, D. Sc. (Eng.)

**Ovchinnikov Yu.V.**

O-355 The technology of obtaining and studying fine-dispersed coal-water slurry : monograph / Yu.V. Ovchinnikov, E.E. Boiko. – Novosibirsk : NSTU Publisher, 2017. – 308 p. (“NSTU Monographs” series).

ISBN 978-5-7782-3119-1

The monograph deals with new approaches to coal processing in terms of their fire and environmental safety, in particular, methods employing coal-water slurries (CWS). A new technology of preparing CWSs based on using state-of the-art apparatuses not applied earlier is proposed.

All the results obtained have been confirmed experimentally on the installations in Akademgorodok.

УДК 662.75-032.35

ISBN 978-5-7782-3119-1

© Ovchinnikov Yu.V., E.E. Boiko, 2017

© Novosibirsk State Technicak University, 2017

Наилучшие результаты, изложенные в настоящей монографии, являются достижением творческого коллектива (2003 – 2012 годы), центром которого были лаборатории кафедры ТЭС НГТУ.

Исключительно большую роль сыграл в этом коллективе Сергей Васильевич Луценко, генеральный директор НПО «Росток». Он сам непосредственно участвовал в разработке и проведении научных исследований и спонсировал большинство лабораторных исследований. Его роль совершенно неопределима при переходе от лабораторных исследований к полупромышленному эксперименту. Он стал организатором и руководителем работ по созданию автоматизированной опытной линии по производству ТД ВУС. Под его руководством был создан полигон для проведения испытаний горения ТД ВУС, он же поддерживал все связи с промышленными организациями и НИИ как в РФ, так и за рубежом.

Глубокие слова благодарности нужно сказать в адрес заведующего лабораториями кафедры ТЭС Юрия Ивановича Сафронова, который приложил много сил в течение ряда лет к созданию лабораторных установок и проведению лабораторных исследований по представленной тематике.

К проведению исследований по опытному и промышленному сжиганию ТД ВУС много усилий приложили аспиранты кафедры ТЭС Алексей Иванович Цепенко и Алексей Валентинович Шихотинов, за что им отдельные слова благодарности.



## ВВЕДЕНИЕ

Мировой рынок углеводородных энергоносителей во второй половине XX века испытал ряд кризисных ситуаций с резким колебанием цены на нефть, и похожая картина, без сомнения, будет наблюдаться в предстоящие 25...30 лет. Все это происходит на фоне устойчивого возрастания стоимости нефти.

Поскольку нефть и ее производные являются основой современной цивилизации, элементарный анализ ситуации говорит о сильной политизации мировой экономической системы в период перехода к постиндустриальной глобализационной экономике, но еще в большей степени о том, что нефти остается все меньше и распределена она крайне неравномерно. Существует представление, что растущий рынок природного газа способен демпфировать колебания на нефтяном рынке. Однако это один из мифов, присущих нашему времени.

Рассмотрим положение с энергоносителями в России. Бытующее мнение о том, что Россия достаточно обеспечена углеводородными энергоресурсами для того, чтобы гарантировать в ближайшие 15...20 лет быстрый и эффективный рост промышленного производства в стране, основано, по существу, на обывательских представлениях о богатстве и неисчерпаемости российских природных ресурсов.

Однако в реальности это далеко не так. Возьмем, например, газ. Для развитой экономики через 20...25 лет необходимо добывать 650...700 млрд м<sup>3</sup>/год природного газа. Но уже сейчас наши основные газовые промыслы работают в режиме падающей добычи, и к 2020 году их производительность будет 140...180 млрд м<sup>3</sup>/год.

В настоящее время 90 % газодобычи обеспечивают Уренгой и Ямбург. За счет чего можно увеличить производство газа на 450...500 млрд м<sup>3</sup>/год? Восточная Сибирь и Якутия в ближайшем будущем способны добавить 5...10 % газодобычи, разведанность территорий на наличие газа и нефти здесь не превышает нескольких процентов.

Основные запасы газа в России – это Надым-Пур-Тазовский район (НПТР), Ямал, шельфы арктических морей с наиболее перспективным для добычи Штокмановским месторождением. Однако путь на Север – это путь к дорогому газу.

Технико-экономические расчеты показывают, что в 2020 году ожидаемая себестоимость газа на Харасавэйском и Штокмановском месторож-



дениях будет 110...125 долл/1000 м<sup>3</sup>, а рыночная цена газа на торговых площадках в Европе составит 145...150 долл/1000 м<sup>3</sup>. Таким образом, коммерческий риск вложения средств в разработку месторождения достаточно велик. В этом случае частный капитал вряд ли будет активен, а освоение за счет бюджета потребует увеличить цену на газ на внутреннем рынке России в несколько раз. Причем следует иметь в виду, что рассмотренный вариант месторождений – это технология строительства заводов по производству сжиженного природного газа (СПГ) с соответствующей инфраструктурой, практически еще не освоенной в России.

Невольно напрашивается вывод о том, что в топливном балансе России, особенно Сибири, в 2020 году мы будем иметь дефицит природного газа.

Некоторое сомнение на этот счет может быть снято при успешном вводе в строй сахалинских месторождений «Сахалин I» (420 млрд м<sup>3</sup>/год) и «Сахалин II» (150 млрд м<sup>3</sup>/год). Однако Сахалинский комплекс – это заводы по схеме СПГ, кроме того, доля российского участия в проекте составляет 25 %.

Каковы же прогнозы на потребление жидкого топлива в ближайшем будущем?

Для оценки вероятного сценария следует иметь в виду следующие тенденции:

- к 2020 году мировое потребление нефти достигнет 115 млн баррелей/сутки и начнет уменьшаться из-за снижения добычи из «традиционных» источников;
- снижение темпов добычи нефти в России началось уже с 2010 года.

Глубина переработки нефти в среднем в мире составляет 85 %, максимальна она на Ближнем Востоке, в США и Европе – более 90 % и минимальна в бывшем СССР – 50,7 % и Китае – 77,8 %. В соответствии с программой развития нефтекомплекса глубина переработки нефти в России должна быть увеличена до 90 %.

Несмотря на неконкурентность российских мазутов на внешнем рынке, цена на них на внутреннем рынке будет расти, а производство их будет сокращаться.

Нужно иметь в виду, что большое количество районных котельных и котельных промпредприятий в азиатской части России работает на мазуте и перевод их на другой вид топлива в ближайшие 15...20 лет весьма проблематичен.



Основная доля добываемой нефти в мире идет на производство моторных топлив. Рынок моторных топлив расширяется, и ничто не указывает на его возможное резкое сокращение в ближайшем будущем.

Все сказанное обуславливает то внимание, которое оказывается развитию угольных технологий. Темпы роста угледобычи значительно превосходят показатели развития прочих энергоресурсов. Так, прогноз ИСЭМ СО РАН индексирует удвоение годовой добычи угля в России к 2020 году и ее учетверение к 2050 году по сравнению с 2005 годом. Уголь обладает для нашей страны рядом преимуществ по сравнению с мазутом. Однако в России сложилась парадоксальная ситуация, когда при достаточной сырьевой базе для полного удовлетворения потребителей в угольном топливе, в силу недальновидных конъюнктурных шагов со стороны энергетиков, уголь уступает газу и нефтяному топливу по затратам и экологическим показателям. Этот парадокс проявляется, в частности, в соотношении цен на нефть, газ и уголь (в расчете по энергетическому эквиваленту) на российском рынке – 1,0 : 0,2 : 0,3 в отличие от мирового рынка, где соотношение – 1,0: 1,0 : 0,4 (2005 – 2006 годы). Несмотря на то что угольная промышленность России – это поле игры многих конкурирующих производителей в отличие от монополизированных нефтяной и газовой промышленности, неконкурентоспособность российских углей в мировой торговле велика, и это объясняется в основном:

- неконкурентоспособностью угля по сравнению с нефтью и газом;
- высокими тарифами на железнодорожный транспорт;
- большими издержками добычи угля из-за недоиспользования производственных мощностей (67 %) и высокого износа основных фондов (60 %).

Важнейшей задачей России является доведение качества угольной продукции до уровня мировых стандартов: зола – 10 % и сера – 1 %. Однако этот уровень не финиш, а промежуточный результат. Достижение уровня золы в 5 % – сравнительно недорогие технологии. Уровень золы в 1...1,5 % и по сере 0,1 % вполне достигим. Индонезия, например, поставляет такие угли на мировой рынок уже сегодня. Выполненные технико-экономические исследования энергетических технологий убедительно показывают, что очистка топлива от вредных компонентов гораздо экономически эффективнее в начале технологического процесса, чем в его завершении.

Технологии переработки угля значительно отстают по эффективности от технологии переработки нефти.



В настоящее время все разрабатываемые технологии получения моторных топлив из угля можно разделить на три группы.

Первая группа – это технологии прямого гидрокрекинга угля. При высоком давлении в атмосфере водорода в присутствии катализатора происходит расщепление органической части угля и насыщение его водородом. К этой же группе относится технология термического растворения углей при 400 °С в органических растворителях. Это процессы: Hygas, H-Coal, Synthoil, SKR, Bi-Gas, Consol, Synthane, технология ИГИ и другие, которые очень трудноосуществимы технологически, а стоимость конечных продуктов делает их нерентабельными. Наиболее перспективное направление – гидрирование углей совместно с переработкой тяжелых нефтяных остатков.

Вторая группа – пиролиз и коксование каменного угля. В этой группе процессов при термической деструкции угля без доступа воздуха получают жидкие, твердые и газообразные продукты.

Низкотемпературный пиролиз (500...600 °С), или полукоксование бурых углей, дает моторное топливо и полукокс. Высокотемпературный пиролиз (900...1000 °С) – коксование дает твердое топливо (кокс) и коксовый газ  $Q_H^p = 17,5 \text{ МДж/м}^3$ .

Твердые продукты пиролиза – облагороженное энергетическое топливо, восстановители и брикеты. Однако стоимость моторных топлив из угля все еще очень велика.

Перспективные технологии в этой группе: COED, Carrent, Toscoal, Coalson, Lurgi-Duhrgaz, установка в Энерготехническом институте им. Г.М. Кржижановского.

Наиболее эффективный способ – установка LFG (США): капиталовложения на уровне 65 долл/т перерабатываемого материала и 6 долл/т переработки. Продукты – высококачественное твердое топливо и малосернистое жидкое топливо.

Третья группа технологий – газификация твердого топлива с последующей переработкой газа в искусственное жидкое топливо (ИЖТ).

Промышленные способы газификации (Лурги, Винклера, Коперс-Тотцека, Тексако) хорошо известны. Прошли опытно-промышленную обработку процессы ЭКСОН (каталитическая газификация угля водяным паром в кипящем слое), МОЛТЕН-СОЛТ (парокислородная газификация при повышенном давлении в расплаве соды), ПАТГАЗ (газификация при атмосферном давлении в расплаве железа).



Известна промышленная технология – получение путем газификации угля синтез-газа и преобразование его в моторное топливо и в химические продукты методом Фишера–Тропша. Процесс хорошо разработан, но дорог.

Технология МОБИЛ – каталитическое (высококремнеземистые цеолиты) превращение метанола в высокооктановый бензин (Институт катализа СО РАН).

Перспективной технологией получения синтез-газа из угля является плазмотермическая технология. В ее основу положены два изученных процесса: аллотермический процесс газификации угольного порошка в водопаровой среде в трубчатом реакторе при температуре ~ 1100...1300 °С с внешним обогревом и плазменная газификация.

Эти условия обеспечивают степень газификации угля до уровня 65...70 %. Дальнейшая газификация угля до уровня 98...99 % с получением синтез-газа достигается в плазменном процессе при водяном паре, как плазмообразующем газе.

Однако то, что легко выполняется в лабораторных условиях в колбе и в реакторе, в условиях промышленного производства наталкивается на почти непреодолимые технологические трудности.

Поэтому такое разнообразие разрабатываемых технологий получения из угля жидких топлив, замещающих моторное и котельно-печное топливо, говорит скорее о том, что все они очень далеки от осуществления. Их промышленная реализация осложняется значительными трудностями технического и технологического характера. Кроме того, зачастую экономика накладывает свое вето на перспективы внедрения процесса. Все рассмотренные процессы требуют высоких температур, давлений, часто состоят из ряда промежуточных стадий, и в этом их недостатки.

Однако среди новых технологий углепереработки, направленных в конечном счете на получение аналогичных результатов (твердых обогащенных топлив, жидких котельно-печных топлив, заменяющих мазут, и топлив, заменяющих моторное топливо для энергетических ГТУ и ДВС), есть технологии, которые выполняются при атмосферном давлении и атмосферной температуре. Эти технологии безопасны в пожарном и экологическом смысле, малозатратны и энергосберегающи.

Речь идет о водоугольных суспензиях (ВУС) и водоугольном топливе (ВУТ). ВУС возникла как топливо при сжигании обводненной угольной мелочи, появляющейся при гидродобыче угля и его гидротранспорте, в 50-х годах XX века. Исследования нового вида топлива



привели к разработке теории ВУС, были найдены дисперсанты (анти-коагулянты) и вещества, повышающие лабильность топлива, все это привело к разработке в 1970 – 1990-х годах ВУТ. В 1980-х годах в ряде стран проводились опытно-промышленные исследования по использованию ВУТ в энергетике, в промышленности и в ЖКХ, которые показали эффективность использования нового топлива, но и выявили его недостатки при промышленном использовании.

ИКЖТ – искусственное композиционное жидкое топливо, дальнейшее развитие технологии ВУТ было разработано в России. При приготовлении ИКЖТ были применены новые принципы дробления твердой фазы: ударно-скалывающий в скоростных мельницах-дезинтеграторах и дробление ударными волнами в кавитационных процессах. Новая технология базируется на новых аппаратах переработки угля в дезинтеграторах и кавитаторах, что позволило повысить качество топлива, значительно снизить энергозатраты на производство, сделать установки по производству топлива компактными. Основное отличие в технологии производства ИКЖТ от технологии производства ВУТ – это активация твердой и жидкой фазы, что в результате дает устойчивую и гомогенизированную топливную систему. Крупность твердой фазы в ИКЖТ – это семьдесят процентов частиц в нанодиапазоне. При использовании в качестве исходного угля деминерализованного угля с содержанием золы до одного процента теплота сгорания такого топлива мало отличается от теплоты сгорания мазута, а по ряду характеристик оно превосходит мазут. Такое ИКЖТ может использоваться широко в энергетике и теплотехнике, в частности как топливо для энергетических ГТУ, работающих на угле.

Опыты по использованию мелкодисперсного ИЖТ в ГТУ и ДВС проводились в США в 2006 – 2007 годах и дали хорошие результаты, ранее опыты по использованию угля в ГТУ и ДВС проводились в России и в некоторых других странах.

Сейчас пока нет большой необходимости разрабатывать угольные ГТУ и ДВС в широком масштабе, но в некоторых частных случаях это и сегодня актуально, а в будущем это, видимо, станет одним из главных направлений развития в малой энергетике.

Изложенные выше этапы развития технологий водоугольного топлива, тенденции на рынке углеводородных топлив и прогнозы на ближайшие 20...30 лет были характерны до кризиса 2008 – 2010 годов.



В настоящее время мы столкнулись с резким падением цен на нефть (2015 год). Это снижение вызвано превышением предложения над спросом на углеводороды на мировом капиталистическом рынке, а другого сейчас нет. Кроме того, мы наблюдаем снижение потребления топлива в энергетических производствах: металлургии, машиностроении, химической промышленности, а также покупательской способности населения в связи с сокращением рабочих мест и т. п.

Нужно учитывать, что развиваются также технологии производства энергии из возобновляемых источников энергии, например, солнечная энергетика и использование энергии ветра.

Анализ причин переживаемого экономического кризиса заставляет нас признать, что это хорошо изученный кризис перепроизводства, который периодически повторяется при нерегулируемой, анархической экономике. По расчетам пик кризиса придется на 30-е годы XXI века. Каков сценарий выхода из кризиса? Сейчас очень трудно определить модель выхода.

Во-первых, этот кризис является мировым (глобальным) кризисом, поскольку мировая экономика приобрела глобальный характер.

Во-вторых, глобальный характер несет еще три определяющих фактора, два из которых имеют антропогенную причину, а один – космическую.

Первый фактор – это глобальное загрязнение окружающей среды и, главное, Мирового океана, а также сельскохозяйственных земель: отходы сельскохозяйственной деятельности (яды и химикаты) реки выносят в океаны Земли, где они в корне изменяют ряд физико-биологических процессов.

Второй фактор – глобальное потепление в земной биосфере. За период 50-х годов XX века среднегодовая температура поверхности Земли выросла на 1 °С и продолжает расти, что уже приводит к серьезным климатическим изменениям, и это невозможно не учитывать в моделях ближайшего будущего.

Пока же согласно аналитике исследования топливный баланс на 2020 – 2030 годы таков: 20 % – газ, 10 % – энергия из возобновляемых источников, 30 % – уголь, остальные углеводороды, доля которых снижена. Доля угля возрастает, но поскольку водоугольное топливо – это технологии нового технологического уклада в угольной промышленности, это внушает оптимизм для технологии ВУТ.

# **ГЛАВА 1**

## **ВОДОУГОЛЬНОЕ ТОПЛИВО (ВУТ), ЕГО ПРИГОТОВЛЕНИЕ, ИСКУССТВЕННОЕ КОМПОЗИЦИОННОЕ ЖИДКОЕ ТОПЛИВО (ИКЖТ)**

### **1.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВУТ – ИКЖТ**

**Т**ехнология получения ВУТ в настоящее время достаточно хорошо разработана в своих основных положениях. Многочисленные публикации в научной литературе, в первую очередь в Японии, Китае, США, Швеции, Италии, в том числе и в России, составляют научную и фактическую базу этой технологии, включая фундаментальные исследования влияния качества углей на характеристики ВУТ, процессы флокуляции и седиментации двухфазной структуры, сжигания топлива и т. д. [1–14].

В качестве примера приведем работы (табл.1.1), выполненные в Японии, которые достаточно хорошо отражают широту и глубину фундаментальных исследований по данной проблеме.

Таблица 1.1

#### **Фундаментальные исследования влияния качества угля на характеристики ВУС**

| №<br>п/п | Влияние качества угля на ВУС  | Основные выводы  |
|----------|---|--|
| 1        | Взаимосвязь смачиваемости водой тонкодисперсного угля и его состава | Характеристики ВУС зависят от смачиваемости углей и содержания в них кислорода |





Продолжение табл. 1.1

| №<br>п/п | Влияние качества угля на ВУС  | Основные выводы  |
|----------|---|--|
| 2        | Взаимосвязь концентрации водоугольной суспензии и состава угля                          | Максимальная концентрация угля в ВУС связана со смачиваемостью и содержанием кислорода в углях   |
| 3        | Влияние характеристик угля на вязкость ВУС  | Вязкость ВУС связана с объемной долей твердого вещества и способностью удерживать воду   |
| 4        | Способность углей поглощать воду: влияние пористой структуры и поверхностного кислорода | Способность разных видов удерживать воду связана с содержанием кислорода и пористой структурой углей                                   |
| 5        | Влияние растворенных минеральных веществ на реологические свойства ВУС                  | Растворение минеральных веществ в диспергирующей среде (воде) влияет на реологию ВУС посредством изменения взаимодействия частиц       |
| 6        | Влияние минеральных веществ на характеристики ВУС                                       | Минеральные вещества, содержащиеся в угле, влияют на реологию и стабильность ВУС   |
| 7        | Корреляция вязкости топлива на основе ВУС и состава угля                                | Вязкость топлива на основе ВУС зависит от зольности, равновесной влажности, содержания кислорода и функциональности кислорода в углях  |
| 8        | Изучение взаимосвязи качества угля и характеристик ВУС                                  | Характеристики ВУС связаны с содержанием О/С в $-C=O$ и $-OH$ группах; содержанием глинистого минерала и основными составляющими углей |
| 9        | Химическое исследование поверхности углей в ВУС   | Карбоксильные группы оказывают сильное воздействие на такие характеристики, как вязкость и поглощение водой                            |



Окончание табл. 1.1

| №<br>п/п | Влияния качества угля на ВУС   | Основные выводы   |
|----------|--|---|
| 10       | Химическое исследование зависимости свойств поверхности различных марок угля от некоторых характеристик, связанных с вязкостью ВУТ | На такие характеристики, как вязкость и поглощение, оказывают влияние кислородсодержащие функциональные группы на поверхности угля, в первую очередь карбоксильные группы, что характерно для 20 марок угля |
| 11       | Взаимосвязь вязкости ВУС и марки угля  | Разные параметры вязкости, электрокинетический потенциал, поглощаемость воды и СО связаны с содержанием карбоксильных групп на поверхности угля   |
| 12       | Поверхностные характеристики угля и их воздействие на поведение ВУС  | Реологические характеристики ВУС по 12 битуминозным и бурым углям зависят от химического состава, поверхностных свойств и материала углей   |
| 13       | Воздействие функциональных групп кислорода, содержащихся в угле, на характеристики ВУС   | Функциональные группы кислорода и другие структурные параметры 10 марок японского угля зависят от суспензионности, а воздействие карбоксильных групп, содержащихся в угле, является доминирующим            |

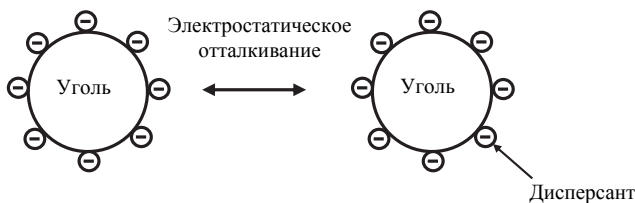
### 1.1.1. ДИСПЕРСАНТЫ И СТАБИЛИЗАТОРЫ, ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Исследования в области устойчивости водоугольных систем выявили влияние некоторых веществ на жидкотекучие свойства ВУТ (лабильность). Интерес представляют такие вещества (называемые дисперсантами), которые снижают вязкость ВУТ без разрушения стабильности системы. Были найдены также вещества, которые повышают устойчивость (стабильность) водоугольной системы, позволяя тем

самым увеличивать массовую долю твердой фазы в ВУТ. Часто одно и то же вещество в различных концентрациях способствует и увеличению лабильности, и стабилизации системы [15–18].

Был установлен механизм стабилизации, основанный на эффекте пространственного затруднения и электростатического отталкивания (рис. 1.1).

1. Эффект электростатического отталкивания



2. Эффект пространственного затруднения

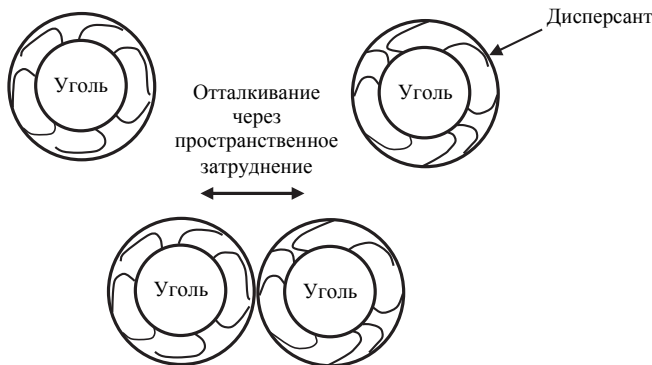


Рис. 1.1. Механизм действия дисперсанта ВУС

Эффект электростатического отталкивания заключается в создании на поверхности угольных частиц электрических зарядов одного знака, тогда как эффект пространственного затруднения состоит в образовании на поверхности угольных частиц слоя из гидроксильных ионов и обрывков гидратных цепочек, препятствующего сближению и слипанию твердых частиц.

В качестве ВУС-дисперсantов были задействованы главным образом полиаминовые электролиты. В табл. 1.2 приведены химические формулы для типичных диспергирующих агентов [1, 2].



Таблица 1.2

## Типичные диспергирующие агенты для ВУС

| Дисперсант  | Химическое строение  |
|---|--|
| Нафталиносulfонат-формальдегидный конденсат (NSF) | $\left( \begin{array}{c} \text{---} \text{C}_6\text{H}_4 \text{---} \text{C}_6\text{H}_4 \text{---} \text{CH}_2 \text{---} \\   \\ \text{SO}_2\text{Na} \end{array} \right)_n$   |
| Полистиролсульфонат (PSS)                         | $\left( \begin{array}{c} \text{CH} \text{---} \text{CH}_2 \text{---} \\   \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\   \\ \text{SO}_2\text{Na} \end{array} \right)_n$  |
| Полиалифатический диеносульфат                    | $\left( \begin{array}{c} \text{CH} \text{---} \text{CH}_2 \\   \\ \text{C} \text{---} \text{CH}_3 \\    \\ \text{CH} \\   \\ \text{SO}_2\text{Na} \end{array} \right)_m \text{---} \left( \begin{array}{c} \text{CH} \text{---} \text{C} \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH}_2 \\   \quad   \\ \text{SO}_2\text{Na} \quad \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$ |
| Полиакриловый сополимер                           | $\left( \text{CH}_2 \text{---} \overset{\text{CH}_3}{\underset{(\text{CH}_2)_2 \text{---} \text{SO}_2\text{Na}}{\text{C}}} \right)_m \text{---} \left( \text{CH}_2 \text{---} \overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{COO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_{10} \text{---} \text{CH}_2\text{Ph}}{\text{C}}} \right)_n$   |
| Полистиролсульфонатовый сополимер                 | $\left( \begin{array}{c} \text{CH} \text{---} \text{CH}_2 \\   \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\   \\ \text{SO}_2\text{Na} \end{array} \right)_n \text{---} \left( \begin{array}{c} \text{CH} \text{---} \text{CH}_2 \\   \quad   \\ \text{O}=\text{C} \quad \text{C}=\text{O} \\   \quad   \\ \text{ON}_2 \quad \text{ONa} \end{array} \right)_m$                        |



Были исследованы возможности стабилизации ВУТ путем увеличения молекулярного веса анионных дисперсантов, при использовании природного полисахарида и неорганических минералов. Все эти исследования подтвердили возможность применения широкого класса органических и минеральных соединений в качестве стабилизаторов водотопливных систем с различной степенью эффективности [21, 22–24].

Однако критерий выбора стабилизатора для ВУТ еще не разработан. Следовательно, необходимо создавать новые стабилизаторы, чтобы исследовать длительность действия стабилизации при долгосрочном использовании [19, 20, 26].

### 1.1.2. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВУТ

Общая теория ВУТ включает в себя реологическую теорию водоугольных суспензий. Согласно этой теории водоугольные суспензии могут проявлять свойства как ньютоновских, так и неньютоновских жидкостей. Для ньютоновских жидкостей реологическое уравнение имеет вид

$$\tau = \mu \gamma, \quad (1.1)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па · с;  $\gamma$  – скорость сдвига, с<sup>-1</sup>.

В зависимости от вида уравнения реологического состояния неньютоновские жидкости обычно разделяют на три группы [1, 2, 26]:

- вязкие – с реологическими характеристиками, не зависящими от времени;
- нестационарные – их реологические характеристики зависят от времени, в течение которого действует напряжение, или от предыстории течения жидкости;
- вязкоупругие, обладающие свойствами как твердого тела, так и жидкости.

Нелинейные характеристики водоугольной смеси, по предположению, получаются в основном из-за зависимости флокуляции твердых частиц от скорости сдвига. Эта зависимость определяется свойствами дисперсной твердой фазы (химическим составом и количеством минеральной части угля, массовой долей твердой фазы и гранулометрическим составом частиц), дисперсионной среды и типом применяемой



пластифицирующей добавки. Однако при стационарных состояниях (течениях) для большинства водоугольных систем реологическое уравнение может быть выражено простой функцией. Выделяют наиболее типичные модели:

- модель степенной зависимости

$$\tau = m\gamma^n ; \quad (1.2)$$

- модель Бингама

$$\tau = m\gamma^n + \tau_y ; \quad (1.3)$$

- модель Гершеля–Баркли

$$\tau = m\gamma^n + \tau_y , \quad (1.4)$$

где  $\tau$ ,  $\gamma$ ,  $\tau_y$  – соответственно напряжение сдвига, скорость сдвига и предел текучести, а  $m$  и  $n$  – параметры модели, различные в (1.3) и (1.4) [1].

В нижнем и среднем диапазоне скоростей сдвига для большинства систем  $n < 1$ . Это означает, что текучесть возрастает по мере увеличения скорости сдвига при разрушении системной структуры между твердыми частицами.

Для некоторых водоугольных топлив наблюдалась при высоких значениях скоростей сдвига степенная зависимость при  $n > 1$ . В этом случае трение между частицами возникает особенно явно в поле потока высокой скорости, например в сопле горелки, а ВУТ называют «дилатантной» жидкостью. При этом наблюдается предел текучести  $\tau_y$ , который соответствует разрушению сетевой структуры между твердыми частицами при начале движения потока жидкости в стационарных условиях [29, 31].

Модели степенной зависимости, Бингама и Гершеля–Баркли относят к неньютоновским жидкостям. В узком диапазоне скоростей сдвига реологические особенности их течения практически близки к ньютоновским жидкостям. Так, для большинства ВУТ с величиной твердой угольной фазы, по весу не превышающей 0,45, реологические зависимости практически не отличаются от линейных.

На рис. 1.2 показаны кривые течения и реологические свойства жидкостей и водоугольных суспензий.

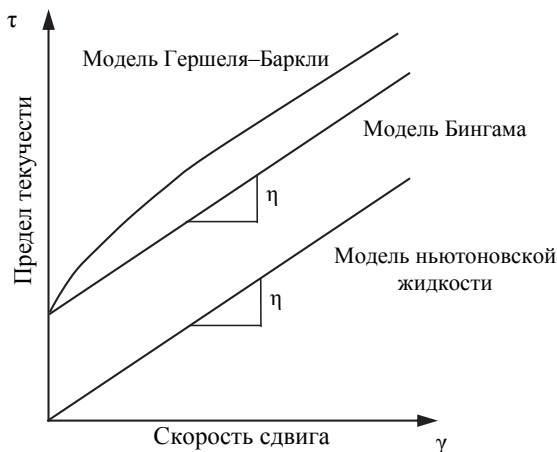


Рис. 1.2. Модели жидкостей

Предел текучести  $\tau_y$  для ВУС для первой группы лежит при скоростях сдвига от  $10^{-1}$  до  $10^{-2}$  ( $\text{с}^{-1}$ ), что вызывает значительные сложности при его эмпирическом определении [33].

В качестве модели для определения  $\tau_y$  часто используют модель Кэссона [1]:

$$\tau^{1/2} = (\eta \gamma^n)^{1/2} + \tau_y^{1/2}. \quad (1.5)$$

В этой модели можно получить точный предел текучести по реологическим данным в относительно высоком диапазоне скоростей сдвига, однако форма этого уравнения неудобна для обработки результатов эксперимента.

### 1.1.3. ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ

Крупность (размер) частиц угля в ВУТ влияет на вязкость системы, ее устойчивость и горение. Влияние крупности частиц угля на вязкость сказывается в зависимости от размеров частиц и от распределения частиц в полидисперсной угольной фазе. В этом случае доля объема твердого



вещества  $\varphi$  принимается за общий параметр. Вязкость ВУТ рассматривается как относительная вязкость  $\eta_r$  (отношение вязкости пульпы к вязкости жидкой фазы) в зависимости от параметра  $\varphi$  [1, 27, 28, 30].

Эйнштейн предложил формулу для случая суспензии с низкой концентрацией твердой фазы в виде сферических частиц в состоянии взвеси в жидкой среде [29]:

$$\eta_r = 1 + 2,5\varphi. \quad (1.6)$$

Обобщенная кривая зависимости

$$\eta_r = f(\varphi) \quad (1.7)$$

получена на основе экспериментов для полностью диспергированной системы с четким мономодальным распределением крупности частиц. Полуэмпирическое уравнение, полученное путем обобщения экспериментов по многим системам диспергирования частиц, было предложено Томасом [30, 31]:

$$\eta_r = 1 + 2,5\varphi + 10,05\varphi^2 + 0,00273 \exp(-16,1\varphi). \quad (1.8)$$

На рис. 1.3 представлено обобщение экспериментальных данных в соответствии с уравнениями Эйнштейна–Томаса для жидкостей первой группы.

Уравнение Томаса получено для сферических частиц при отсутствии флокуляции. Для случаев флокуляции в ВУТ и полидисперсной твердой фазе с несферическими частицами могут быть предложены различные варианты формул, например формулы Муни [1]:

$$\eta_r = \exp \frac{2,5\varphi}{1 - k\varphi} \quad (1.9)$$

и Роско

$$\eta_r = (1 - \varphi/\varphi_c)^{-2,5}, \quad (1.10)$$

где  $\eta_r$  и  $\varphi$  – соответственно относительная вязкость и объемная фракция твердого вещества, а  $k$  и  $\varphi_c$  – параметры для оценки возрастания вязкости при подаче в флокуляционную систему растворителя.



Есть и другие формулы, позволяющие учесть в простых моделях влияние флокуляции и несферичности частиц в ВУТ: формула Франкеля и Акривоса [32, 33], формула Патела и Рассела [34], формула Чанга, Христиансена и Баера [37] и ряд других. Надо отметить, что большинство этих выражений имеет частный характер и не может быть применено во всех случаях дисперсных водоугольных систем.

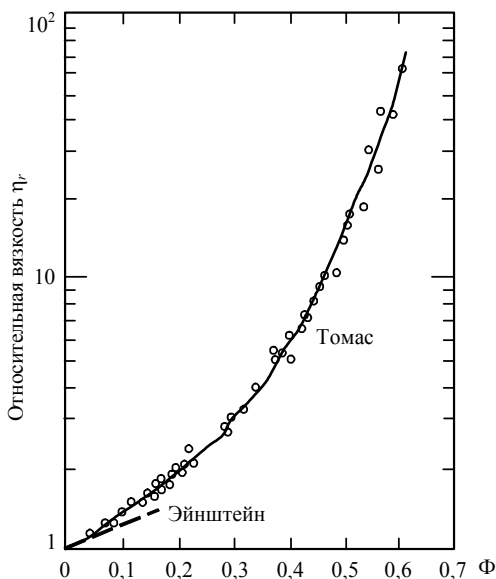


Рис. 1.3. Относительная вязкость дисперсионных смесей; воздействие доли объема твердого вещества на относительную вязкость  $\eta_r$

(Все результаты экспериментов были получены для полностью диспергированной системы с четким мономодальным распределением крупности частиц. Подробное пояснение ключевых моментов построения этого графика вы найдете в оригинале трудов Томаса.)

Что касается влияния на вязкость распределения крупности в полидисперсной твердой фазе, то для приготовления водоугольного топлива с высокой концентрацией угля и низкой вязкостью необходимо



брать пыль с большой долей (не менее 45 %) мелких фракций (не более 15...20 мкм), однако на вязкость системы при этом будет влиять большое количество и других факторов: изменение распределения крупности частиц под действием флокуляции, несферичность частиц, проявление трения и столкновения между частицами. Однако модели с учетом этих факторов еще не созданы [25, 35, 36, 42, 43, 44].

Для производственных технологий для выбора оптимального распределения крупности частиц в ВУТ были предложены различные способы (Функ, Андреасен–Андерсен, Усуи, Йошикава, Янагимачи и др.). Они сводились к введению поправок в кривую распределения максимальной плотности упаковки в зависимости от соотношения между размерами частиц [1].

На рис. 1.4 показано распределение частиц в ВУТ, оптимальное с точки зрения высокой концентрации угля и максимальной текучести. Оптимальная область заштрихована между линиями *B* и *C*, однако современные технологии приготовления ВУТ сдвигают этот параметр ближе к линии *A*.

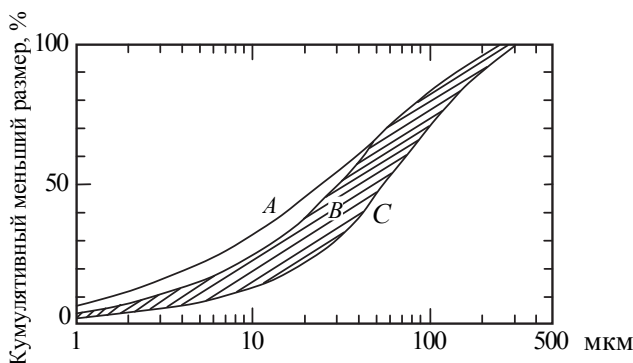


Рис. 1.4. Пример оптимального распределения крупности частиц угля в ВУС

В отечественной литературе проблеме оптимального гранулометрического состава для водоугольного топлива посвящен ряд работ [16, 17, 20]. При этом наиболее технологически приемлемо и технически доступно получение бимодального гранулометрического распределения частиц угля, т. е. такого распределения, при котором в дисперсной системе содержится только две фракции – крупная и мелкая, а проме-



жуточная отсутствует. На основе указанного принципа были разработаны и запатентованы несколько составов [35, 36].

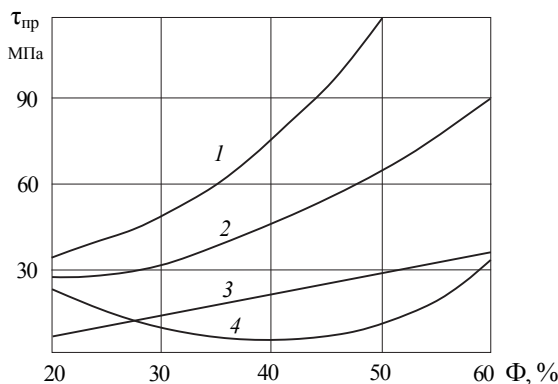


Рис. 1.5. Зависимость предельного напряжения сдвига  $\tau_{\text{лр}}$  водоугольной суспензии ( $C = 67\%$ ) от содержания мелкой фракции  $\Phi$ , %, при содержании среднего класса:

1 – 40 %; 2 – 20 %; 3 – 10 %; 4 – 0,0 %

В качестве примера приведен рис. 1.5, из которого следует, что при массовой доле твердой фазы в водоугольной суспензии  $C_T = 67\%$  наименьшее значение предельного напряжения сдвига, а следовательно, и эффективной вязкости в системе, состоящей из трех классов угольных частиц – мелкого ( $< 70$  мкм), среднего (70...160 мкм) и крупного (160...250 мкм), достигается при полном исключении среднего класса.

#### 1.1.4. ТИКСОТРОПНОЕ СОСТОЯНИЕ ВУТ

В интервале массовых концентраций угля в водоугольном топливе 0,45...0,6 возможен переход ВУТ к тиксотропной системе, когда одновременно вся жидкая топливная система схватывается и образует гель. Однако если размешать гель миксером, он снова переходит в жидкотекучее состояние. С практической точки зрения тиксотропное состояние ВУТ представляет большой интерес. Длительное наблюдение за ВУТ в состоянии геля при хранении в герметически закрытых



емкостях подтверждает сверхустойчивость этого состояния. Топливо в тиксотропном состоянии суперстабильно, не расслаивается и не коагулирует и при этом сохраняет свою структуру неограниченно длительное время.

Именно сверхстабильность ВУТ, по нашему мнению, является важным коммерческим фактором. Стремление получить лабильное водоугольное топливо с содержанием твердой фазы до 70 % наталкивается на почти непреодолимые трудности либо на ограничения по крупности частиц. Но переход ВУТ в тиксотропное состояние позволяет надежно хранить это топливо, транспортировать на любые расстояния, а затем на месте использования возвращать в лабильное состояние с удовлетворительной вязкостью путем размешивания системы обыкновенным миксером либо насосом с добавлением некоторого количества воды [16, 21, 22, 23, 24].

Физически тиксотропное состояние объясняется согласно современным представлениям тем, что текучесть при движении тиксотропной системы развивается постепенно по времени и зависит от предыдущего состояния. Образно говоря, в стабильном состоянии системы возникают внутренние связи между элементами системы. Эта структура является многовариантной.

Внешнее воздействие, вызывающее движение системы, переводит систему из стабильного в лабильное состояние. Однако разрушение связей или структуры при движении системы происходит не одновременно, а растянуто по времени и соответственно многовариантно (рис. 1.6).

Тиксотропные модели можно грубо классифицировать на модели, основанные на теории абсолютной скорости реакции, и модели, основанные на феноменологии [1]. Хан, Ри и Эйринг моделировали тиксотропное поведение, применив в качестве теории скорости реакции теорию пустот. Их теория может дать количественные обоснования влиянию прошлых сдвигов на напряжение сдвига, наблюдаемому при проведении испытания на подъем с одинаковой скоростью; в результате трудно

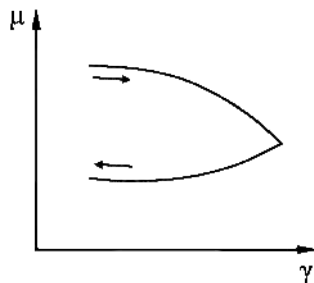


Рис. 1.6. Зависимость вязкости от скорости сдвига для тиксотропной системы [3]



вести характеристики диспергированной суспензионной смеси в параметры модели, поскольку теоретического развития она еще не получила. В свою очередь модель, основанная на феноменологии, пробует объяснить нарушение строения структуры между твердыми частицами в понятиях соответствующих физических величин. Предполагалось множество таких моделей. Чанг с коллегами [37] предложили следующее общее уравнение тиксотропной модели, основанной на феноменологии:

$$\tau = \eta(\lambda, \gamma)\dot{\gamma}, \quad (1.11)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = f(\lambda, \dot{\gamma}), \quad (1.12)$$

где  $\tau$ ,  $\eta$ ,  $\lambda$  и  $\gamma$  – соответственно напряжение сдвига в двухмерном течении, кажущаяся вязкость, тиксотропный параметр временной зависимости и скорость сдвига.

Модель Чанга оказалась очень удачной. В развитие этой модели был предложен ряд моделей, основанных на его подходах. Из них наиболее известны модели Усуи и Шимански [38, 39].

В модели Усуи отражен тот факт, что тиксотропная система в условиях длительного постоянного сдвига демонстрирует в экспериментах внутреннее напряжение без внешних сил, независимо от того, какие сдвиги применялись ранее. Такое напряжение получило название «равновесное». Кроме того, известно, что измеряемые напряжения сдвига получаются разного порядка и это в основном зависит от прошлых сдвигов. Разница между измеряемым напряжением сдвига в каждый наблюдаемый промежуток времени и равновесным напряжением была определена как «структурное напряжение», т. е. напряжение сдвига в любое произвольное время можно выразить следующим образом:

$$\tau = \tau_p + \tau_c, \quad (1.13)$$

где  $\tau$ ,  $\tau_p$ ,  $\tau_c$  – соответственно напряжения сдвига: измеряемое, равновесное и структурное.



Усуи смоделировал условия формирования и условия разрушения напряжения структуры на основе эксперимента в виде

$$\frac{d\tau_c}{dt} = \frac{\tau_{\infty} - \tau_c}{\lambda_c} - K\eta^{1/2}\lambda\tau_c, \quad (1.14)$$

где  $\tau_{\infty}$ ,  $\lambda$ ,  $K$  – соответственно конечная полученная величина структурного напряжения, постоянная времени формирования структуры и параметр разрушения структуры. Здесь  $\tau_{\infty}$  выступает как структурное напряжение в крайне малом диапазоне скорости сдвига, когда в достаточно долгий промежуток времени сохраняется стационарное состояние.

Японский центр утилизации угля предложил обобщенную унифицированную методику исследования тиксотропности путем оценки реологических характеристик и других физических свойств водогольной суспензии [40], произведенной различными компаниями.

Используя эти подходы, Усуи [41] предложил упрощенную реолдванногическую модель тиксотропной системы. Модель Усуи основана на распределении крупности частиц и на учении о развитии флокуляции в тиксотропной системе. Предполагая, что только частицы минимального диаметра могут принимать участие в флокуляции, можно по конечному числу распределений крупности частиц определить приближенно условия образования флоккул и их долю в распределении. Количество частиц  $n$ , обладающих минимальным диаметром, содержащихся в флокуле, принимается за тиксотропный параметр. Определяя энергию связи  $F_0$  между частицами минимального диаметра, срок разрушения при сдвиге можно получить из уравнения равновесия сил, когда сферические образования (флокулы) в поле сдвига разрушаются и дополняются, согласно броуновской теории, флокуляцией и условиями флокуляции при сдвиге в предыдущем состоянии.

Уравнение равновесия для  $n$  можно представить как

$$\frac{dn}{dt} = \frac{4\alpha_B k_B T N_0}{3\eta_0} + \frac{4\alpha_s \Phi n \gamma}{\pi} - \frac{3\pi d_0 n}{8F_0} \left[ \frac{n}{1-\varepsilon} - 1 \right] \eta \gamma^2, \quad (1.15)$$

где  $\alpha_B$ ,  $k_B$ ,  $T$ ,  $N_0$ ,  $\alpha_s$ ,  $\Phi$ ,  $\eta_0$  и  $d_0$  – соответственно: константа Броуна ( $\alpha_B = 0,58$ ), константа Больцмана, абсолютная температура, количе-



ство частиц минимального диаметра на единицу объема, константа флокуляции сдвига ( $\alpha_s = 0,6$ ), объемная доля твердого компонента, вязкость ликвидной (жидкой) фазы, минимальный диаметр частицы. Эти величины известны по условиям приготовления смеси. Незвестной величиной, кроме  $n$ , в уравнении является доля пустот ( $\varepsilon$ ).

Распределение доли пустот может быть выражено через приближенное уравнение

$$1 - \varepsilon = \varepsilon_{\max} + (1 - \varepsilon_{\max}) \exp[-1n(n^{0,4})], \quad (1.16)$$

где  $\varepsilon_{\max}$  – доля пустот при неплотной упаковке, если  $n$  велико.

При корректировке этого уравнения была использована модель Хаппеля для оценки ячеек вокруг сферических частиц твердого вещества дисперсной системы [42].

В результате модель Усуи позволяет получать характеристики тиксотропной системы с достаточной степенью точности всего по двум измерениям вязкости: в широком диапазоне скоростей сдвига и среднем диапазоне скоростей сдвига.

В России исследование высококонцентрированных водоугольных систем и их стабилизации активно проводилось в связи со строительством опытно-промышленного комплекса по производству ВУТ в г. Белово и транспортировкой этого топлива по трубопроводу в г. Новосибирск (262 км) на электростанцию ТЭЦ-5. Теоретические и практические вопросы водоугольных суспензий в связи с разработкой высококонцентрированных суспензий затрагивались в статьях в специальной литературе [46–52]. Обобщение реологии ВУТ отражено в статьях [16, 17].

## **1.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВУТ В МИРЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА**

### **1.2.1. МИРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО ВУТ**

Производство ВУТ в настоящее время еще не является достаточным для конкуренции с углеводородными топливами. Однако некоторые ведущие в технологическом отношении страны работают над развитием и



совершенствованием производства ВУС-ВУТ, постепенно увеличивая объемы использования водоугольного топлива в энергетике, котельных, технологических печах и т. п. [1, 2, 3, 4, 5, 14, 59, 60, 61].

Первые успешные опыты по промышленному сжиганию водоугольных суспензий были проведены в разных странах в 50-х годах XX века. Промышленные технологии использования ВУС начали развиваться особенно в 1970-х годах в связи с энергетическим кризисом на рынке углеводородов. В последующем цены на нефть упали, и интерес к ВУС стал снижаться, однако в 80-х, 90-х годах XX века цены на нефть стали устойчиво расти, что привело к ассигнованиям на исследования в области технологии ВУС, разработку водоугольного топлива ВУТ и дальнейшее развитие этой технологии [4, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 61].

Потенциальная экономичность угольного топлива определяется относительно низкой стоимостью энергии, получаемой при его сжигании (на ТЭС) – примерно 1,5 долл. за 1 МДж для битуминозного угля против 4,5 долл. за 1 МДж для мазута (по ценам энергоносителей в 1997 г. в США: мазута – 150, угля 30...40 долл. за 1 т на месте доставки [4]).

Ниже приводятся данные по разработке водоугольного топлива и технологиям его производства в некоторых странах.

### **1.2.2. ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ ВУТ В КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКЕ**

В этой стране научные исследования и опытно-промышленные работы в области приготовления и сжигания водоугольного топлива проводят с начала 80-х годов XX века. В настоящее время проблемой водоугольного топлива занимаются три научно-исследовательских центра, совмещенных с производством [1, 2, 62, 63, 64]. Построено шесть заводов по приготовлению ВУТ с годовой производительностью 0,88 млн т (табл. 1.3) [65, 66, 67].





Таблица 1.3

## Заводы по приготовлению ВУТ в Китайской Народной Республике

| Предприя-<br>тие     | Производи-<br>тельность,<br>тыс. т/год | Технология<br>и применяемое<br>оборудование  | Свойства ВУТ   | Год<br>вы-<br>пуска |
|----------------------|--|--|--|---------------------|
| Завод<br>в г. Вайн   | 50 (первая<br>очередь)                 | Получение ВУТ высо-<br>кой концентрации<br>из флотационного<br>концентрата; четыре<br>вибрационные мель-<br>ницы ZM 1200.<br>Получение ВУТ вы-<br>сокой концентрации<br>из флотационного кон-<br>центрата и обогащен-<br>ного угля; одна шаро-<br>вая мельница $d$ 2,4×8 м<br>и пять вибрационных<br>мельниц ZM 2800 | Концентрация<br>$67 \pm 1$ %, вязкость<br>$1 \pm 0,2$ Па·с, сред-<br>ний размер частиц<br>менее 50 мкм, золь-<br>ность 9 %, низшая<br>теплота сгорания<br>20,0 МДж/кг, ста-<br>бильность более<br>3 мес. | 1990                |
|                      | 200 (вторая<br>очередь)                |  |  | 1998                |
| Завод<br>в г. Янри   | 250                                    | Получение ВУТ сред-<br>ней и высокой концен-<br>трации из обогащенно-<br>го угля; одна шаровая<br>мельница $d$ 4,2×13,2 м<br>и одна шаровая мель-<br>ница с 2,4×4,2 м  | Концентрация<br>$70 \pm 2$ %, вязкость<br>менее 1 Па·с,<br>Содержание кл.<br>0–0,74 мм – $80 \pm 5$ %, низшая теплота сго-<br>рания 20,0 МДж/кг,<br>стабильность более<br>6 мес.                         | 1992                |
| Завод<br>в г. Пекине | 250                                    | Получение ВУТ сред-<br>ней концентрации<br>с применением филь-<br>трации и смешивания<br>некоторого количества<br>ВУТ; четыре шаровые<br>мельницы SRR 2,1×3,6  | Концентрация<br>> 65 %, вязкость<br>1 Па·с, максималь-<br>ный размер частиц<br>300 мкм, средний<br>диаметр частиц ме-<br>нее 55 мкм, стабиль-<br>ность 15 суток  | 1993                |



Окончание табл. 1.3

| Предприя-<br>тие        | Производи-<br>тельность,<br>тыс. т/год | Технология<br>и применяемое<br>оборудование   | Свойства ВУТ  | Год<br>вы-<br>пуска |
|-------------------------|--|---|---|---------------------|
| Завод<br>в<br>г. Шенгли | 70                                     | Получение ВУТ высо-<br>кой концентрации с ис-<br>пользованием рядово-<br>го угля; одна шаровая<br>мельница $d$ 1,5×5,7 м,<br>одна шаровая мельни-<br>ца MQJ 2700×3600<br>и две вибрационные<br>мельницы ZM 1200 | Концентрация<br>> 66 %, вязкость<br>менее 1 Па·с, раз-<br>мер частиц менее<br>300 мкм, стабиль-<br>ность 3 мес.       | 1990                |
| Завод<br>в г. Датонг    | 30                                     | Получение ВУТ высо-<br>кой концентрации<br>из рядового угля; одна<br>шаровая мельница<br>$d$ 1,83×8 и две вибра-<br>ционные мельницы<br>ZM 1200   | Концентрация<br>> 66 %, вязкость<br>менее 1 Па·с, раз-<br>мер частиц менее<br>300 мкм, стабиль-<br>ность более 1 мес. | 1992                |
| Завод<br>в г. Жужоу     | 30                                     | Получение ВУТ высо-<br>кой концентрации<br>из флотационного кон-<br>центрата; одна вибра-<br>ционная мельница ZM<br>1200  | Концентрация<br>> 66 %, вязкость<br>менее 1 Па·с, раз-<br>мер частиц менее<br>50 мкм, стабиль-<br>ность более 3 мес.  | 1994                |

### 1.2.3. ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ ВУТ В ЯПОНИИ

К разработке промышленных технологий производства и сжигания ВУТ в Японии приступили в начале 1980-х годов [1]. В создании таких технологий принимали участие организации: «Electric Power Development», «Joban Joint Ltd.», «Tokyo Electric Power», «Tohoku Electric Power», «Kansai Electric Power», «JGC», «Ube Industries Ltd», «Kubota Ltd», корпорация «Hitachi Zosen» и другие. Начиная с 1985 по



1987 год было сожжено 56 000 т ВУТ, приготовленного фирмами «Mitsubishi» и «Hitachi», а также 7500 т ВУТ, произведенного фирмой «JGC». Группа из 10 компаний, включая «Ube Industries Ltd», «Kubota Ltd» и корпорацию «Hitachi Zosen», проводила совместные показательные испытания, включающие в себя приготовление, хранение, транспортирование и сжигание ВУТ в качестве топлива в промышленных котлах малой и средней мощности. Испытания проводили с 1986 г. в течение трех лет под руководством Исследовательского центра угледобывающей промышленности Японии [5].

Демонстрационные проекты показали возможность практического применения ВУТ в качестве топлива, включая процессы приготовления, хранения и транспортирования.

Приготовление ВУТ осуществляет компания «Japan COM» в количестве 500 000 т в год на двух установках производительностью по 25 т/ч каждая. Производство ВУТ начато с июня 1993 г.

Производимое ВУТ сжигается в энергетическом котле электростанции в г. Накосо компанией «Joban Joint Power Ltd». На котле установлено 12 горелок ВУТ с расходом по 11 т/ч. Состав топлив, сжигаемых в котле, следующий: ВУТ – 40 %, уголь – 40 % и мазут – 20 %. От станции приготовления в г. Онахама до потребителя ВУТ транспортируют по трубопроводу длиной 9 км и диаметром 350...400 мм.

Первый мировой опыт международной торговли ВУТ получен в японо-китайском проекте. В марте 1992 г. впервые в мире было выполнено коммерческое транспортирование ВУТ из одного государства (Китай, г. Шандонг) в другое (Япония, г. Китаньоша) и далее потребителю в г. Охаяма.

Особенностью технологической схемы (рис. 1.7) является измельчение угля в двух шаровых мельницах с низкой и высокой концентрацией угля. Суспензия с низкой концентрацией и крупностью до 500 мкм из шаровой мельницы поступает в вакуум-фильтр, на котором обезвоживается до влажности 20...40 %. Затем полученный кек поступает в смеситель. Во вторую мельницу подают реагент-пластификатор, и полученная в ней суспензия с массовой долей твердого вещества 60...80 % и крупностью до 100 мкм (содержание частиц крупностью < 10 мкм более чем 40 %) поступает на смешивание с первым потоком суспензии. После смешивания получают готовое ВУТ с массовой долей твердого вещества 60...70 % и вязкостью 1 Па · с.

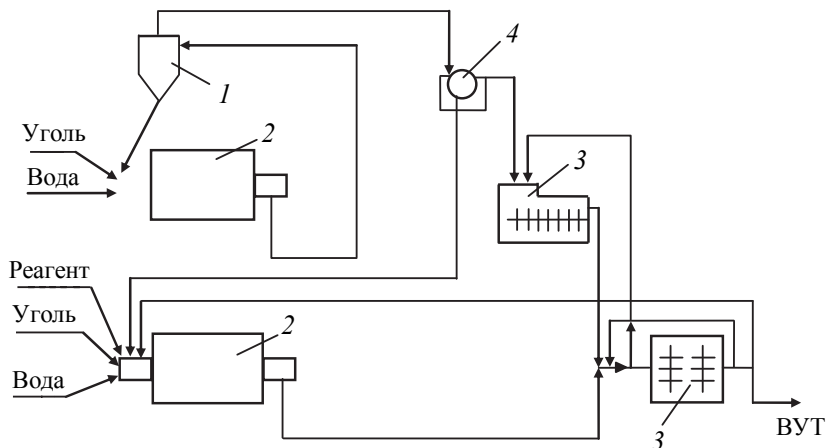


Рис. 1.7. Технологическая схема приготовления ВУТ на японо-китайском предприятии «Yanqi CWM»:

1 – гидроциклон; 2 – шаровые мельницы; 3 – смесители; 4 – вакуумный фильтр

Демонстрационные и коммерческие проекты производства и сжигания ВУТ в Японии представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

#### Демонстрационные и коммерческие установки ВУТ Японии

| Компания и ее местонахождение                 | Технология приготовления, производительность установки  | Тип котла и его характеристика, способ доставки ВУТ  | Год и объем реализации                                       |
|---|---|--|--|
| «Electric Power Development Ltd», г. Вакамацу | Двухстадийное измельчение с получением ВУТ высокой концентрации 1,5 т/ч                           | Опытное оборудование для сжигания  | 1983–1987  |
| «Ube Industries Ltd», г. Убе                  | Двухстадийное измельчение с получением ВУТ высокой концентрации + среднее обогащение угля 0,2 т/ч | Опытное оборудование для сжигания, котел паропроизводительностью 80 т/ч, от установки по приготовлению ВУТ транспортируют до котла (1 км) на барже | 1990–1992, 45 900 т, в том числе 3600 т из обогащенного угля |



Продолжение табл. 1.4

| Компания<br>и ее местона-<br>хождение           | Технология<br>приготовления,<br>производительность<br>установки                                | Тип котла<br>и его характеристика,<br>способ доставки ВУТ   | Год<br>и объем<br>реализации                   |
|---|--|---|--|
| «Mitsubishi Heavy Industries Ltd»,<br>г. Накосо | Одностадийное измельчение при высокой концентрации<br>1,5 т/ч                                  | Энергетическая станция в г. Накосо, котел № 4 (75 МВт, 260 т пара/ч)  | 1985–1986                                      |
| «Hitachi Ltd»,<br>г. Накосо                     | Одностадийное измельчение при высокой концентрации<br>1,5 т/ч                                  |   | 1985–1986,<br>56 000 т                         |
| Корпорация<br>«JGC», г. Анои                    | Двухстадийное измельчение при низкой концентрации<br>1,5 т/ч                                   | Котел № 1 (33 МВт) компании «Kansai Electric Power» в г. Химейн, от г. Анои до г. Химейн (20 км) ВУТ доставляли автотранспортом | 1986–1987,<br>7500 т                           |
| «Kawasaki Heavy Industries Ltd»,<br>г. Катима   | Одностадийное измельчение при высокой концентрации<br>26 т/ч                                   | Нет данных  | 1986   |
| «Kubota Ltd»,<br>г. Вакаяма                     | Измельчение при высокой концентрации<br>5 т/ч  | Котел трехэтапного сжигания (34 т пара/ч) компании «Hitachi Zosen», в г. Каинане, доставка ВУТ автотранспортом (16 км)          | 1987–1989,<br>17 600 т                         |
| «Ube Industries Ltd»,<br>г. Убе                 | Получение обогащенного ВУТ путем масляной агломерации (мазут), 0,5 т/ч                         |   | 1987–1989,<br>910 т                            |
| «Japan COM Ltd», г. Онахама                     | Одностадийное измельчение при высокой концентрации и удаление золы в спиральном классификаторе | Котел (110 т пара/ч) с мазутным розжигом компании «Idemitsu Kosan», г. Томакомаи  | 1990,<br>9000 т<br>ВУТ<br>с зональностью 1,5 % |



Окончание табл. 1.4

| Компания<br>и ее местона-<br>хождение                       | Технология<br>приготовления,<br>производительность<br>установки  | Тип котла<br>и его характеристика,<br>способ доставки ВУТ  | Год<br>и объем<br>реализации                                 |
|---|--|--|--|
| Компания<br>«Japan CJM<br>Ltd»,<br>г. Онахама               | Одностадийное из-<br>мельчение при вы-<br>сокой концентрации<br>(система тяжелой<br>промышленности<br>«Hitachi» и (Kavasa-<br>ki), 2×50 т/ч) | Котел № 8 (600 МВт)<br>энергетической станции<br>испытаний «Joban Join<br>Thermal Power», г. На-<br>косо; от г. Онахама<br>до г. Накосо ВУТ транс-<br>портируют по трубо-<br>проводу (8,6 км), $d =$<br>$= 350$ мм на 2,2 км<br>и $d = 400$ мм на 6,4 км<br>( $d$ – диаметр трубопро-<br>вода) | 1993,<br>500 000 т/год                                       |
| «Yanri CWM»<br>(Китай–<br>Япония),<br>г. Шандонг<br>(Китай) | Параллельное из-<br>мельчение при вы-<br>сокой и низкой кон-<br>центрации, 36 т/ч  | Котел (45 т пара/ч) кор-<br>порации «Tausa»<br>в г. Окаяма. Котел № 1<br>(125 МВт) энергетиче-<br>ской станции компании<br>«Chudoku Electric Power»<br>в г. Мицushima. Одна из<br>16 угольных горелок пе-<br>реоборудована на сжи-<br>гание ВУТ  | 1992–1996,<br>50 000 т/год<br><br>1995–1996,<br>25 000 т/год |

Ниже приведены описание, технологическая схема и технологические характеристики оборудования для производства ВУС компанией «Mitsubishi». Это опытно-промышленная установка для отработки технологии топлива.

Образцы ВУС для испытаний по сжиганию производятся на оборудовании завода «Nakoso Power Plant»: две линии производственного оборудования ВУС производительностью 15 т/ч были подготовлены «Mitsubishi Heavy Ind.» и «Hitachi Works» соответственно. На рис. 1.8 и в табл. 1.5 показаны соответственно системная диаграмма производственного оборудования ВУС, приготовленной «Mitsubishi», и его технические характеристики. Это оборудование производит ВУС по

технологической схеме, состоящей из системы мокрого измельчения при низкой концентрации и системы обезвоживания, что позволяет производить ВУС с минимальными затратами энергии из многих типов угля. Кроме того, удаление крупных частиц угля особенно важно для улучшения характеристик горения. Это производится в классификаторе. При включении блока обогащения легко происходит снижение зольности и содержания серы. Сначала исходный уголь подается из угольного бункера в барабанную мельницу мокрого помола вместе с водой. Таким образом, получается смесь с низкой концентрацией угля (около 40 %). Смесь с низкой концентрацией угля закачивается в бак-сборник, чтобы затем пройти процесс разделения в классификаторе. Крупные частицы угля с диаметром более 149 мкм возвращаются в мельницу для доизмельчения. Суспензия с частицами угля менее 149 мкм направляется в сепаратор, где происходит процесс обезвоживания и получается кек с концентрацией угля 70 % или более. Обезвоженный кек смешивается с присадками в стабилизаторе суспензии, хорошо перемешивается и направляется в рабочий бак для хранения.

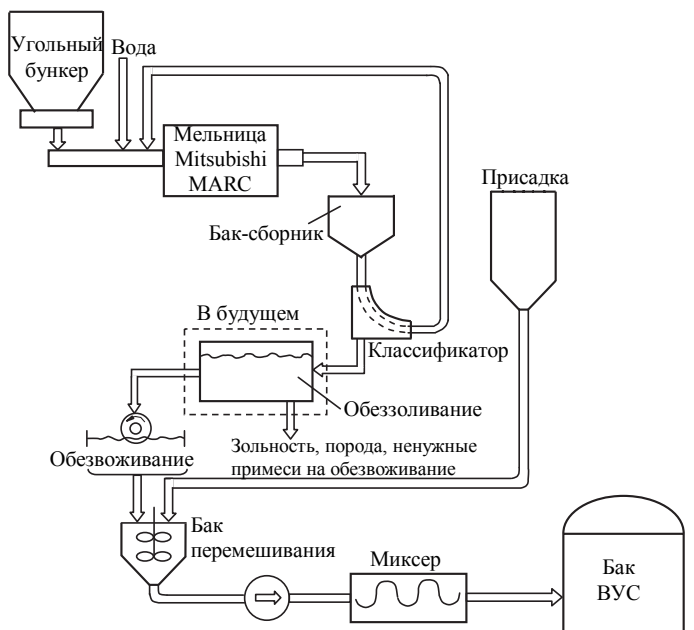


Рис. 1.8. Система производства ВУС компании Mitsubishi



Компанией «Hitachi Ltd» была создана система производства ВУС с высокой концентрацией угля, основанная на имеющихся ноу-хау. Были проведены демонстрационные испытания оборудования производства ВУС с производительностью 15 т/ч на электростанции Nakoso фирмы «Joban Kyodo Karyoku». Эти испытания продемонстрировали эффективность технологии Hitachi Ltd.

Таблица 1.5

### Технические характеристики оборудования для производства ВУС

| Оборудование                          | Характеристики            | Технические характеристики                         |   |
|---------------------------------------|---------------------------|--|---|
| Угольная мельница (дробильная машина) | Тип                       | Барабанная мельница мокрого помола Mitsubishi MARC |   |
|                                       | Количество                | 1  |   |
|                                       | Мощность                  | 10,5 т/ч (на сухом угле)                           |   |
|                                       | Мощность двигателя        | 450 кВт  |   |
| Сепаратор/классификатор               | Тип                       | Дуговое сито                                       |   |
|                                       | Количество                | 2  |   |
|                                       | Мощность                  | 35 м <sup>3</sup> /ч                               |   |
| Вакуумный фильтр для обезвоживания    | Тип                       | Дисковый фильтр (вакуумного типа)                  |   |
|                                       | Количество                | 1  |   |
|                                       | Мощность                  | 10,5 т/ч (на сухом угле)                           |   |
|                                       | Мощность двигателя        | 150 кВт × 2 (вакуумный насос)                      |   |
| Система перемешивания смеси           | Конфигурация оборудования | Бак перемешивания смеси № 1                        | 1 |
|                                       |                           | Миксер № 1   | 1 |
|                                       |                           | Бак перемешивания смеси № 2                        | 1 |
|                                       |                           | Миксер № 2   | 1 |





Таблица 1.6

## Технические характеристики оборудования по производству ВУС

| Название оборудования: Демонстрационный завод Nakoso Unit № 4              |                           |                                 |
|--|---------------------------|---------------------------------|
| Тип: Система приготовления высококонцентрированной ВУС мокрым измельчением |                           |                                 |
| Выход продукции: 15 т/ч  |                           |                                 |
| Производитель: Hitachi, Ltd  |                           |                                 |
| Номер оборудования   | Основное оборудование     | Тип                             |
| 1  | Угольный питатель         | Весовой дозатор                 |
| 2  | Дробилка                  | Молотковая дробилка             |
| 3  | Питатель шаровой мельницы | Винтовой тип                    |
| 4  | Шаровая мельница          | Шаровая мельница мокрого помола |
| 5  | Насос суспензии           | Двухосный винтовой насос        |
| 6  | Фильтр                    | С автоматической очисткой       |

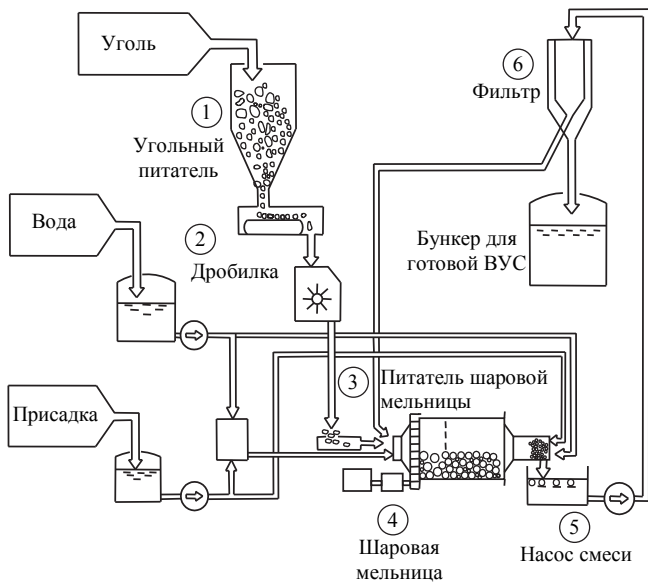


Рис. 1.9. Технологическая схема производства ВУС с высокой концентрацией угля



#### 1.2.4. ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ ВУТ В ИТАЛИИ

Итальянские фирмы стали активно заниматься исследованиями водоугольного топлива в связи с возможностью эквивалентной замены им нефти. К тому же ВУТ оказалось конкурентоспособно и с газовым топливом. В результате фирмой «Snamprogetti» (Милан) был разработан процесс приготовления водоугольного топлива Reocarb, отличительной особенностью которого является получение близкого к бимодальному распределения частиц твердой фазы по размерам [2]. Были построены достаточно крупные заводы по приготовлению ВУТ в г. Ливорно и Порто-Торрес и переоборудованы энергетические установки фирмы «ENEL» для его сжигания мощностью 35 и 75 МВт. Фирма «Snamprogetti» принимала участие в строительстве и эксплуатации завода по производству ВУТ годовой производительностью 500 000 т в год в г. Порто-Торрес для нефтехимического комплекса фирмы «Enichem». Завод предназначен для переработки 350 000 т угля, обогащенного путем разделения в тяжелой среде и сферической агломерации. В результате зольность угля составляет 3,5 % при содержании серы не более 0,5 %, что отвечает принятым в Италии нормам выбросов серы для энергетических установок мощностью 500 МВт. Предполагается, что часть ВУТ будет использоваться в котлоагрегате мощностью 70 МВт, принадлежащем той же нефтехимической компании, а излишки должны продаваться другим потребителям.

Технология и оборудование для производства ВУТ на этом заводе соответствуют технологиям, принятым и установленным на импортных технологических линиях на головных сооружениях ОПУ «Белово – Новосибирск».

Фирма «Snamprogetti» активно пропагандирует транспортирование ВУТ по трубопроводу как возможность экологически чистой доставки угля на большие расстояния [68, 69, 71, 72, 73, 74].

#### 1.2.5. ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ ВУТ В КАНАДЕ

Исследованиями технологий приготовления и сжигания ВУТ в этой стране начали заниматься в начале 1970-х годов [2]. В 1984 г. фирма «Lafard Canada Inc.» продемонстрировала процесс приготовления ВУТ непосредственно перед сжиганием в роторной цементной



печи. Для приготовления ВУТ использовали уголь и «хвосты» мокрого обогащения. Отсутствие больших транспортных коммуникаций позволило отказаться от применения дорогостоящих реагентов-стабилизаторов. Были использованы только дешевые реагенты для улучшения процесса диспергирования угля и снижения вязкости ВУТ. При сжигании ВУТ в цементной печи удалось на 60...90 % отказаться от дорогостоящего природного газа. При производительности цементного завода в 30 000 т в год замена на 90 % природного газа позволяет окупить затраты на переоборудование установки менее чем через 6 мес. [75, 76].

В г. Сиднее (Нова Скотия) была построена пилотная установка для приготовления ВУТ по технологии Carbogel (Швеция) производительностью 7 т ВУТ в час. Водоугольное топливо авто- и железнодорожным транспортом перевозили для сжигания в демонстрационных установках в г. Четхем, Нью Брансвик и Шарлоттентаун, Принс Эдвард Айленд. Одновременно ВУТ сжигали в паровом котле целлюлозно-бумажного завода в г. Хантспорте (Нова Скотия).

В соответствии с канадско-германским соглашением по разработке водоугольного топлива после гидротранспортирования ВУТ сжигали в пилотной установке. Однако в дальнейшем в связи со снижением цен на нефть и нефтепродукты Канада сократила программы исследований и разработок по ВУТ, несмотря на то что они уже достигли стадии промышленного внедрения. Однако отдельные фирмы продолжают заниматься разработкой ВУТ применительно к использованию в таких процессах, как парогазовая газификация угля с внутрицикловой газификацией (ПТУ с ВЦГ), сжигание угля в кипящем слое при повышенном давлении (CFBC) и др. [78, 79, 83].

### **1.2.6. ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ ВУТ В США**

В США была разработана программа использования угля в промышленной и бытовой энергетике («Чистый уголь») [99].

Большое внимание в США уделяют приготовлению ВУТ из отходов мокрого обогащения угля. При этом используют как улучшенные процессы обогащения с целью извлечения 32...52 % угольной мелочи, содержащей углерод, так и обычные процессы утилизации угля путем сжигания в виде водоугольной суспензии. Экономические расчеты



показали, что производство ВУТ на основе угля, извлеченного из отходов («флотохвостов»), на 2/3 дешевле, чем приготовление водоугольного топлива из рядового угля. По данным специалистов, количество образующихся углеотходов в США, из которых можно готовить низкосортные ВУТ, составляет 40...50 млн т/год [85, 88, 90].

Получение ВУТ для совместного сжигания с порошкообразным углем в котлах, работающих на угле, стало целью ряда демонстрационно-испытательных программ в США в 90-е годы XX века [81, 92].

В конце 90-х годов XX века в США большое внимание уделялось демонстрационным проектам по использованию водоугольных суспензий для газификации и сжигания в котлах с кипящим слоем под давлением (рис. 1.10).

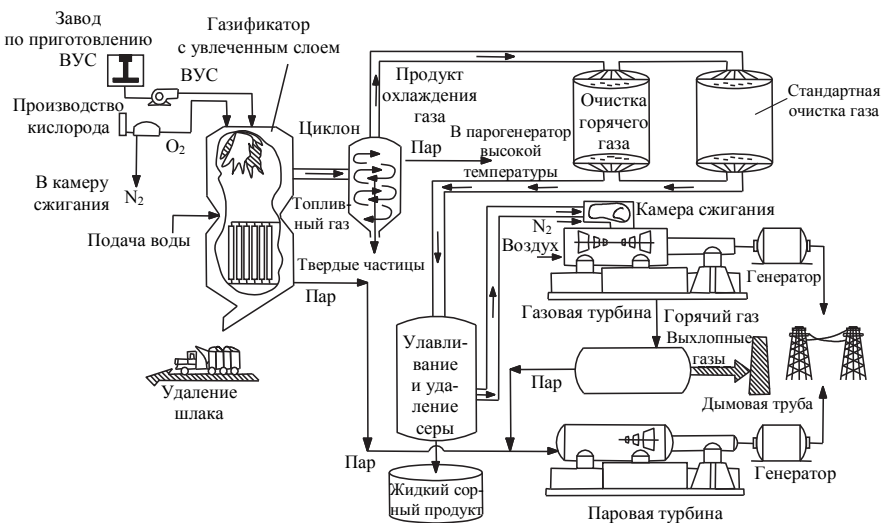


Рис. 1.10. Схема для газификации и производства электроэнергии на основе ВУТ

В настоящее время в США производится ВУТ из деминерализованного угля (зольность не более 1...1,5 %), как заменителя котельно-печного топлива и тяжелых моторных топлив. Известны положительные результаты использования деминерализованного ВУТ в ГТУ и в энергетических ДВС [92, 99, 100].



Большое внимание при разработке ВУТ для технологических целей уделяется экологической чистоте сжигания этого топлива. Разрабатываются программы десульфуризации и денитрации продуктов сгорания водоугольного топлива [80, 87, 89, 95, 96]. Эти работы проводились также в Англии и других странах (Швеция) [77, 78, 85, 87, 88, 94].

Есть ряд работ по международной торговле ВУТ [82, 86].

### **1.2.7. ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ ВУТ В РОССИИ**

Работы по исследованию, производству и использованию водоугольных суспензий в России (СССР) начали проводиться с 60-х годов XX века. С самого начала разработки имели полную государственную поддержку. К этим работам были подключены ведущие научные организации Минуглепрома: Институт горючих ископаемых, Донецкий угольный институт, Институт горного дела им. А.А. Скочинского, ВНИИГидроуголь; проектные институты: Теплоэлектропроект, Оргэнергострой, Промэнерго и др. Инженерная проработка пилотных установок базировалась на научных исследованиях отечественных ученых.

Стендовые эксперименты по сжиганию водоугольных суспензий, проведенные в Институте горючих ископаемых [101, 102], позволили детально исследовать закономерности выгорания суспензии и влияние на полноту выгорания топлива температуры воздуха, коэффициента избытка воздуха, влажности, крупности, зольности водоугольной суспензии, условий ввода топлива и воздуха, а также ряда других параметров и дать рекомендации для опытно-промышленной проверки разработанного метода в различных топочных устройствах.

В результате лабораторных исследований условий воспламенения капли водоугольной суспензии и механизма взаимодействия топлива с кислородом воздуха, водой и водяным паром в высокотемпературной среде построена гипотеза выгорания распыленной водоугольной суспензии, положенная в основу теоретического анализа развития процесса [103–105].

Работа опытно-промышленных установок, сооруженных в Донбассе на шахте Лутугинская-Северная, в Кузбассе на Анжерской ЦЭС, на Магнитогорском металлургическом комбинате и на Жилевской опытно-промышленной обогатительной фабрике, дала материал, полностью



подтверждающий результаты теоретических разработок, лабораторных и стендовых исследований.

На опытно-промышленной установке на шахте Лутугинская-Северная (трест Ленинскуголь) в результате совместной работы УкрНИИГидроуголя, Промэнерго и ИГИ проведены полные теплотехнические испытания промышленного парового котла ДКВр-6,5/13 паропроизводительностью 6,5 т/ч, работающего на водоугольной суспензии из угля марок Г и Т [107, 108]. Одновременно на установке были изучены условия хранения и приготовления водоугольной суспензии из этого угля [43, 108], а также условия работы используемых механизмов.

Накопленный опыт позволил перейти к реализации более масштабных проектов. Таким проектом стал проект опытно-промышленного энергетического комплекса «Белово – Новосибирск». В г. Белово (Кемеровская область) был построен комплекс приготовления водоугольной суспензии, включая обогатительную фабрику. В г. Новосибирске на ТЭЦ-5 предусмотрено строительство приемного комплекса, включая обезвоживание водоугольной суспензии, освещение технологической воды и подготовку топлива к сжиганию. Один из энергоблоков ТЭЦ-5 был переоборудован под сжигание водоугольной суспензии (котел 640 т/ч пара и турбина мощностью 180 МВт). Из Белово в Новосибирск суспензия передавалась по гидроуглепроводу, на котором было две подкачивающие станции.

К разработке и осуществлению проекта были привлечены сибирские научные организации: Сибирское отделение АН СССР, СибВТИ и ряд других, а также итальянская фирма «Snamprodgetti».

На первой стадии реализации проекта производилось опытное сжигание водоугольной суспензии на Беловской ГРЭС с блоками 200 МВт (котел ПК-40, производительностью 640 т пара в час).

Технологическая схема производства водоугольного топлива показана на рис. 1.11. В соответствии с этой схемой для приготовления ВУТ использовали либо уголь с обезвоживающей фабрики (уголь кл. 0...3 или 0,5...13 мм марки Г пласта Грамотеинский), либо привозной уголь марок Д и Г. Для мокрого измельчения угля были установлены две мельницы: шаровая типа 1456А и стержневая МШЦ 1500×3000.

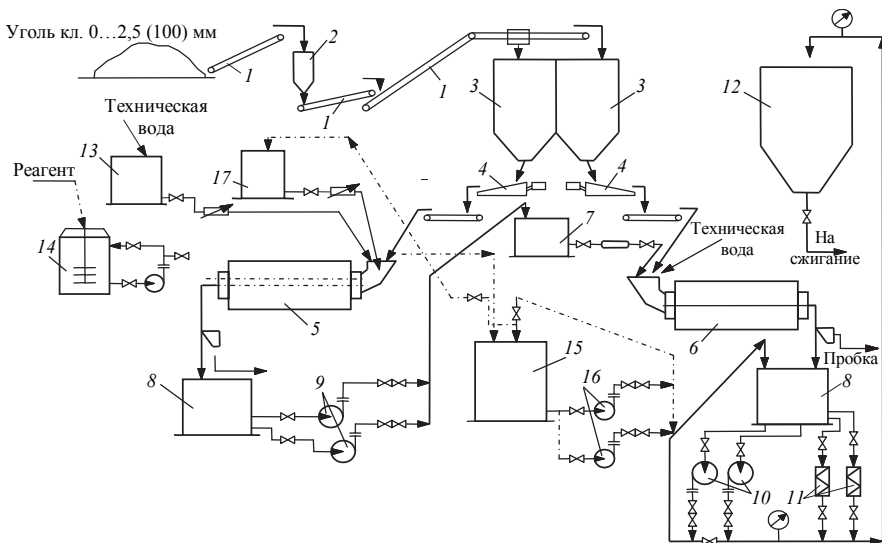


Рис. 1.11. Технологическая схема опытной установки для приготовления, гидротранспорта и сжигания ВУТ:

1 – конвейеры; 2 – дробилка молотковая; 3 – бункеры исходного угля; 4 – дозаторы; 5 и 6 – шаровая и стержневая мельницы; 7 – расходный бак,  $V = 3 \text{ м}^3$ ; 8 – баки для суспензии,  $V = 20 \text{ м}^3$ ; 9 и 10 – насосы центробежные консольный К 20/30 и грунтовый ГрТ 160/71; 11 – насосы винтовые 1В 20/10-16/10; 12 – бункер accumulating,  $V = 450 \text{ м}$ ; 13 – резервуар; 14 – мешалка УРП-3М; 15 – резервуар раствора реагента,  $V = 10 \text{ м}^3$ ; 16 – насосы химические; 17 – расходный бак реагента; штрихпунктирными линиями обозначены трубопроводы для реагентов

Согласно этой технологии тонкое (до кл. 0...25 мкм) мокрое измельчение 30...35 % угля осуществляли в присутствии реагента-пластификатора НФУ (СЗ) в шаровой мельнице, а окончательное измельчение остальной массы угля (65...70 %) вместе с суспензией после шаровой выполняли в стержневой мельнице. В связи с этим предусматривали дозированную подачу суспензии из шаровой мельницы в стержневую.

Эксперименты с подачей ВУТ в котел ПК-40 Беловской ГРЭС установили, что он устойчиво работает при номинальном режиме и снижении нагрузки до 70 %. Наблюдалось уменьшение концентрации оксидов азота в дымовых газах на 25...30 % при работе котла на водо-



угольном топливе (650...700 мг/м) по сравнению со сжиганием угольной пыли (880...930 мг/м<sup>3</sup>).

В процессе испытаний успешно осуществлен пуск котла из холодного состояния и достигнут номинальный режим работы на ВУТ по типовой схеме розжига котла при пылевидном сжигании. При этом подачу угольной пыли в котел не производили. Общее количество ВУТ, сожженного в котле ПК-40 Беловской ГРЭС, составило около 19 тыс. т.

Опыты по сжиганию ВУС в котле НТЭЦ-5 прошли успешно, но транспортировка топлива по гидроуглепроводу была связана с некоторыми проблемами, которые привели к разрыву трубы, в результате чего эксплуатацию комплекса приостановили.

### **1.3. ИСКУССТВЕННОЕ КОМПОЗИЦИОННОЕ ЖИДКОЕ ТОПЛИВО (ИКЖТ)**

В новых экономических условиях в России крупные энергетические объекты, такие как энергокомплекс «Белово – Новосибирск» с гидроуглепроводом ВУТ на расстояние 260 км, вряд ли возможны. Однако существует большая проблема энергоносителей для многочисленных котельных и промышленных печей в отдаленных северных и восточных районах страны. Эти установки предназначены для работы на мазуте, цена на который на месте установки составляет 8000...8500 руб/т, но в то же время имеются местные угли различных типов, которые могут быть использованы для ВУТ – ИКЖТ.

Переделка таких установок под твердое топливо часто технически сложна, а одновременная замена их невозможна. Системы газопроводов в этих местах отсутствуют, к тому же газ дефицитен и является экспортным товаром.

Использование небольших по производительности установок производства ИКЖТ прямо на месте позволило бы решить эту проблему.

Строительство мини-электростанций и теплоэлектроцентралей электрической мощностью 10...15 МВт при крупных предприятиях выгоднее ориентировать на ВУТ – ИКЖТ, поскольку цены на мазут растут и в ближайшем будущем неизбежен рост цен на газ.





Можно также с большой долей вероятности прогнозировать развитие внутрицикловой газификации в схемах ТЭС и ТЭЦ наиболее востребованных мощностей, а также использование деминерализованных углей для производства ВУТ.

### **1.3.1. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВУТ**

Начиная с 1995 г. в лаборатории проблем теплоэнергетики при кафедре «Тепловые электрические станции» Новосибирского государственного технического университета разрабатывалась технология композиционного жидкого топлива на основе угля и торфяного геля в качестве дисперснонесущей среды. Торфяной гель выполнял роль пластификатора, в качестве стабилизирующего компонента использовались отходы нефти. Это топливо получило название искусственного композиционного жидкого топлива (ИКЖТ). Важным его достоинством было то, что оно состояло из дешевых местных компонентов и не уступало по своим характеристикам ВУТ из сортных углей. В установке для производства ИКЖТ был применен впервые кавитатор-диспергатор. Его роль заключалась в глубоком диспергировании (менее 20 мкм) угольных частиц при воздействии на них кавитационным полем. Было получено несколько вариантов ИКЖТ, которые при испытаниях показали хорошие топливные характеристики. Были оформлены патенты РФ на вещество и на способ его получения [109, 110].

Новый подход к производству ВУС и ВУТ проявляется также и в работах других авторов. Понимание того, что новые технологии должны быть энерго- и металлосберегающими, малозатратными и компактными, хорошо прослеживается в ряде разработок, использующих новые аппараты для технологических процессов. Так, В.С. Баяевым (ТДА «Технологии») была создана установка с использованием дезинтегратора (быстроходной пальцевой мельницы) для размола угля и устройства гидроударного действия для получения жидкого многокомпонентного топлива [111]. Демонстрационный стенд, смонтированный на технологической площадке ЦНИИОлово, позволял осуществить весь процесс получения топлива и его сжигания.



Энергопотребление в установке В.С. Баева составляло  $\sim 20$  кВт  $\cdot$  ч/т продукции. При традиционных технологиях удельное энергопотребление составляет [112]:

- предприятием по производству ВУТ компании «Janri CWM Ltd» (Китай) – 248,18 кВт  $\cdot$  ч/т;
- ОПУ «Белово – Новосибирск», Россия – 192 кВт  $\cdot$  ч/т;
- Исследовательским центром по угледобыче (Япония) – 86,12 кВт  $\cdot$  ч/т.

Авторы А.Д. Петраков, С.М. Радченко и О.П. Яковлев разработали способ получения водоугольного топлива и технологическую линию для его осуществления [113].

Промышленные испытания опытной установки проводились на «Енисейском ЦБК» фирмой «Радекс». Полученное топливо сжигали на котельном предприятии в топке котла БКЗ-75. Производительность установки – 30 т/ч топлива. Основными элементами в технологии производства ВУТ являются кавитаторы. Кавитатор первой ступени переработки (мощность электродвигателя 110 кВт) является низкочастотным и служит для предварительного кавитирования системы вода–уголь. Кавитатор второй ступени (мощность электродвигателя 90 кВт) служит для окончательной переработки пульпы до получения ВУТ. Рабочие органы обоих кавитаторов выполнены из низколегированной стали, легко заменяются при минимальных трудозатратах.

Металлоизнос составил 0,103 кг/ч, а удельный износ – 0,031 кг/т угля. Энергозатраты были 21,1 кВт  $\cdot$  ч/м<sup>3</sup> ВУТ, или 17 кВт  $\cdot$  ч на тонну продукции [114].

Низкие энергозатраты характерны также и для виброволновых технологий. Так, ООО «Компомаш» декларирует для своей установки по получению экологически чистого ВУТ с вибромельницей удельные энергозатраты на уровне 15 кВт  $\cdot$  ч/т продукции (<http://www.compomash.ru/print/p-10shtml>).

### 1.3.2. АКТИВАЦИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИКЖТ

Анализ патентных описаний, журнальных статей для новых технологий приготовления ВУТ привел к выводу, что авторы в большинстве случаев не учитывают механохимические эффекты, которые



имеют место в процессе приготовления ВУТ, или считают их незначительными.

Анализ существующей теории ВУТ приводит к этому же выводу.

Был выполнен анализ работ по механохимии и исследований жидкостей при кавитации. Были проведены лабораторные эксперименты, которые подтвердили большой удельный вес механохимических эффектов в процессах трансформации энергии при диспергировании твердых тел и в кавитационных процессах. Особенно это относится к технологическим процессам переработки вещества в аппаратах, в которых механическая энергия подводится адресно в потоках с высокой концентрацией в зону производства. Такими аппаратами являются дезинтеграторы.

В дезинтеграторе и кавитаторе имеют место механохимические эффекты. При скоростном ударно-скалывающем (ударно-сдвиговом) измельчении угля происходит деформация структуры образующихся частиц и увеличение их внутренней энергии [Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 303 с.]. Это означает, что частицы становятся более активными в физико-химических (образование структуры ИКЖТ) и химических (горение) процессах. В кавитаторе происходит активация твердой и жидкой фазы под воздействием кавитации [Кулагин В.А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук, Красноярск, КГТУ, 2004. – С. 47]. В целом ИКЖТ приобретает более высокую реакционную способность. Это выражается в снижении температуры воспламенения ИКЖТ.

Таким образом, была сформулирована гипотеза: предварительная механоактивация твердых и жидких компонентов композиционного жидкого топлива существенно влияет на топливные и технологические характеристики топливной физико-химической системы.

Это положение проверено в лаборатории и подтверждено. Были получены топлива, стабильность которых превышала год и более. Оказалось, что в ряде случаев нет необходимости в пластификаторах. Повышение реакционной способности особенно заметно при сжигании углей, размолотых в дезинтеграторе, по сравнению с углями одинакового по характеристикам помола в ШБМ.



Были изготовлены твердоугольные брикеты на основе активированного ИКЖТ и угольной крошки из листованского антрацита. Топливные характеристики брикетов соответствовали характеристикам качественных углей, а их воспламенение происходило при температуре 480...520 °С.

Анализ технологических установок производства композиционных топлив показал, что слабым звеном в них является кавитатор. Переработка в кавитаторе водоугольной смеси приводит к износу рабочих органов и, как следствие, небольшой продолжительности межремонтного периода аппарата и соответственно снижению надежности всей технологической линии. Резервирование кавитатора удорожает установку.

Однако исходя из представлений о механохимических эффектах в активированных компонентах и учитывая время релаксации активированных состояний, вполне возможно активировать в кавитаторе только жидкость, а смешивание и получение топливной системы осуществлять в быстроходном миксере.

Тогда принципиальная схема установки может быть представлена следующим образом (рис. 1.12). Схема была проверена в лаборатории. Предположения об улучшении качества ИКЖТ подтвердились. Таким образом, эта схема обеспечивает высокую технологичность установки. Способ получения активированного ИКЖТ и установка запатентованы [98, 115].

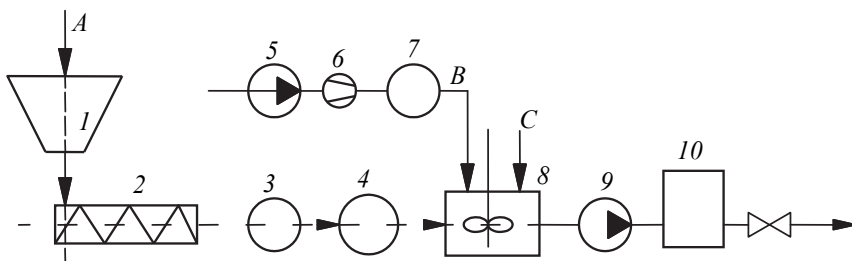


Рис. 1.12. Блок-схема установки производства ИКЖТ с активацией компонентов:

1 – бункер угля; 2 – шнековый питатель; 3 – дробилка; 4 – дезинтегратор; 5 – жидкостный насос; 6 – расходомер; 7 – кавитатор; 8 – миксер; 9 – перекачивающий насос; 10 – бак

Был проведен анализ существующих конструкций дезинтеграторов и кавитаторов с позиций механоактивации углей при диспергации и воды при воздействии на нее кавитационным полем. Были сформулированы требования к аппаратам с максимальным механохимическим эффектом. Эти рекомендации были учтены при разработке новых конструкций (см. главу 2).

В соответствии с рекомендациями на основе теоретических положений о бимодальном распределении крупности твердой фазы в стабилизированных ВУТ принципиальная блок-схема установки для приготовления ИКЖТ приобретает вид, показанный на рис. 1.13.

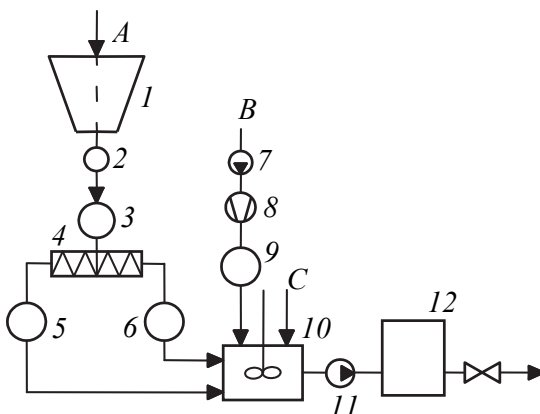


Рис. 1.13. Блок-схема установки для приготовления бимодального ИКЖТ:

1 – бункер угля; 2 – роторный питатель; 3 – дробилка; 4 – шнековый питатель; 5 – дезинтегратор; 6 – дисмембратор; 7 – насос; 8 – ротаметр; 9 – кавитатор; 10 – высокооборотный миксер; 11 – перекачивающий насос; 12 – бак ИКЖТ

Бимодальная установка позволяет получить стабилизированное топливо по двум параметрам: по оптимальному распределению крупности частиц и по соединению активированных твердых частиц с гидрорадикалами и созданию пространственного затруднения.

Предложенные схемы технологических установок производства ИКЖТ позволяют решить основную задачу – получение стабильного водоугольного топлива с повышенной реакционной способностью



при приемлемом для энергетических установок коэффициенте готовности.

Оптимальное распределение потока угля в схеме на рис. 1.13: 40 % на дезинтеграторе и 60 % на дисмембраторе. Мода угольных частичек после дезинтегратора лежит в диапазоне 20...30 мкм, мода частичек после дисмембратора – в диапазоне 50...60 мкм.

Предложенные установки характеризуются низким удельным потреблением электроэнергии на производство единицы топлива (17...20 кВт · ч/т) и малой металлоемкостью.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Теория водоугольных топлив (ВУТ-ИКЖТ) в настоящее время разработана достаточно для понимания физических и химических процессов при создании устойчивых и калорийных топливных систем с минимальной вязкостью. Однако некоторые вопросы требуют дополнительных исследований, это: поиск новых более эффективных дисперсантов и стабилизаторов, а также исследование топлив с деминерализованными углями ( $A < 1...1,5\%$ ).

2. Технологии производства и использования ВУТ, реализованные на опытно-промышленных установках и некоторых крупных промышленных котлоагрегатах, основаны на применении положений теории ВУТ при использовании традиционной для углепереработки техники 50 – 80-х годов XX века. Эти установки характеризуются высоким энергопотреблением, металлоемки, требуют значительных капиталовложений, что в основном и определило их неконкурентность с традиционными угольными технологиями для энергоустановок.

3. Предложена новая технология производства ВУТ-ИКЖТ, основанная на использовании современных аппаратов, не применявшихся ранее в углепереработке. Размол угля до получения ультрадисперсной угольной пыли осуществляется в высокоскоростных дископальцевых мельницах ударно-скалывающего типа – дезинтеграторах. Переработка водоугольной суспензии для получения тонкодисперсной гомогенной топливной системы выполняется в кавитаторах при использовании кавитационного поля.

Угольная пыль после дезинтегратора активирована и аккумулирует в себе часть энергии ударного воздействия, жидкая фаза (вода) после



кавитатора также активирована и запасает в себе часть энергии кавитационного поля. При соединении этих двух активированных фаз топливная система приобретает новые свойства, в том числе повышенную стабильность и реакционную способность.

В настоящее время установка по производству ИКЖТ доведена до уровня производственного модуля. По своим характеристикам модуль соответствует энергосберегающим и ресурсосберегающим установкам.

## ГЛАВА 2

### АКТИВАЦИЯ ТВЕРДОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗЫ. ДЕЗИНТЕГРАТОРЫ И КАВИТАТОРЫ

**В** соответствии с работами различных авторов по исследованию ВУС-ВУТ и ИКЖТ водоугольное топливо представляет собой не просто смесь мелкодисперсного угольного порошка с водой, а некоторую физико-химическую систему, свойства которой не сводятся только к свойствам исходных компонентов. В этом проявляется принцип эмерджентности, известный при исследовании сложных систем.

Вместе с тем свойства компонентов системы являются определяющими для системы. В настоящей главе мы рассмотрим изменение свойств угля при его диспергации до размеров в порошке  $\sim 30$  мкм и меньше и свойств воды при ее обработке в кавитационном поле и попытаемся связать эти изменения с требованиями к аппаратам переработки – дезинтеграторам и кавитаторам.

#### 2.1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ДИСПЕРГАЦИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Теория разрушения (деструкции) твердых кристаллических и аморфных тел разработана достаточно полно. Рассматривая разрушение материала как одновременный разрыв связей между всеми атомами, расположенными по обе стороны площадки в  $1 \text{ см}^2$ , выбранной перпендикулярно растягивающей силе, Орован [116] получил для расчета напряжения отрыва одной части от другой уравнение

$$P_{\text{теор}} = \left( \frac{2E\sigma}{a} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.1)$$

где  $a$  – постоянная решетки;  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $E$  – модуль Юнга.





При подстановке обычных значений  $E$ ,  $\sigma$ ,  $a$  в выражение (2.1) получают теоретическое значение  $P_{\text{теор}} \approx 10^{10} \text{ Н/м}^2$ , что на 2...3 порядка выше экспериментальных значений  $P$ .

Объясняя это несоответствие, Гриффитс [117] предположил, что в хрупком теле имеются микротрещины, которые вызывают концентрацию напряжений, достаточную для локального превышения теоретической прочности. Трещина в твердом теле развивается, если упругая энергия в трещине, равная  $P^2 \ell^2 / 2E$  ( $\ell$  – длина трещины), превышает энергию, необходимую для образования поверхности  $2\sigma\ell$ ; таким образом, при заданном  $\ell$  напряжение разрыва равно

$$P = \left( \frac{2E\sigma}{\ell} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.2)$$

Из сравнения (2.1) и (2.2) следует:

$$\frac{P}{P_{\text{теор}}} = \sqrt{\frac{a}{\ell}}. \quad (2.3)$$

Поскольку  $a \approx 10^{-10}$  м, достаточно иметь в твердом теле трещину длиной  $\ell = 10^{-6}$  м, чтобы прочность тела понизилась в 100 раз по сравнению с теоретическим значением.

Ребиндер [118] применил эти представления и для разрушения твердых тел, которое сопровождается заметным пластическим деформированием. В таком случае связь прочности тела с размером зародышевой трещины  $\ell$  может быть описана выражением, сходным с уравнением Гриффитса:

$$P = \left( \frac{\sigma^* E}{\ell} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.4)$$

Здесь  $\sigma^*$  – «эффективная поверхностная энергия», представляющая собой удельную (на единицу вновь образующейся поверхности) работу разрушения. Она включает, помимо истинной поверхностной энер-



гии  $\sigma$ , и работу пластических деформаций на единицу поверхности трещины. Величина  $\sigma^*$  может на несколько порядков превосходить истинное значение  $\sigma$ , но, как отмечал Ребиндер, работа пластических деформаций коррелируется с величиной  $\sigma$ . При снижении  $\sigma$ , например, путем введения поверхностно-активных веществ понижается и работа пластической деформации.

Систематический и детальный анализ характера временных зависимостей прочности, а также прямое изучение элементарных процессов, происходящих в напряженных твердых телах, показали, что «критические» значения прочности, рассчитанные на основе энергетической теории, не являются стабильными и приводят к необходимости учета теплового движения атомов в твердом теле. Этот подход составляет основу кинетического подхода к проблеме прочности твердых тел, разработанного Журковым с сотрудниками [119, 120].

Согласно кинетической теории прочности разъединение атомов происходит при нагрузках, меньших прочности межатомных связей, причем «дорывание» напряженных межатомных связей осуществляют тепловые флуктуации. Константа скорости разрыва связей увеличивается по экспоненциальному закону:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{U - \gamma P}{RT}\right), \quad (2.5)$$

где  $U$  – активация разрушения;  $P$  – энергия деформации;  $\gamma$  – коэффициент пропорциональности.

Результаты исследования долговечности различных веществ под нагрузкой показали, что энергия активации разрушения совпадает с теплотой испарения веществ  $E$  (кДж/моль) [120].

Близость этих величин свидетельствует о близости первичных стадий процессов. В процессе испарения атомов с поверхности веществ в каждом акте отрыва атома от кристаллической решетки, как это показано Френкелем [121], разрываются связи, число которых соответствует примерно половине координационного числа. Для образования элементарного разрыва в решетке также должны быть разорваны единичные связи в количестве, близком к половине координационного числа.



Таблица 2.1

**Сравнение энергии активации разрушения веществ с теплотой испарения**

| №<br>п/п | Вещество | $U$ ,<br>кДж/моль | $E_{\text{исп}}$ ,<br>кДж/моль | №<br>п/п | Вещество | $U$ ,<br>кДж/моль | $E_{\text{исп}}$ ,<br>кДж/моль |
|----------|----------|-------------------|--------------------------------|----------|----------|-------------------|--------------------------------|
| 1        | Si       | 473               | 465                            | 7        | Ag       | 260               | 277                            |
| 2        | Ge       | 382               | 382                            | 8        | Zn       | 126               | 130                            |
| 3        | LiF      | 310               | 268                            | 9        | Al       | 220               | 230                            |
| 4        | NaCl     | 276               | 243                            | 10       | Fe       | 419               | 407                            |
| 5        | KCl      | 232               | 222                            | 11       | Pt       | 503               | 532                            |
| 6        | Cu       | 340               | 336                            |          |          |                   |                                |

Первая научная теория измельчения была разработана Реттингером (1867 г.) [122]. Он исходил из предположения, что работа измельчения затрачивается на образование новой поверхности, т. е. в эквивалентных количествах переходит в свободную поверхностную энергию. Закон выражается уравнением

$$A = k_p S, \quad (2.6)$$

где  $A$  – удельная работа измельчения;  $k_p$  – коэффициент, определяющий работу, затрачиваемую на создание единицы поверхности.

В соответствии с другой теорией, предложенной Киком (1883 г.), работа измельчения затрачивается на упругопластическую деформацию, которую нужно произвести, чтобы разрушить твердое тело:

$$A = k_k V, \quad (2.7)$$

где  $V$  – объем измельчаемого тела;  $k_k$  – коэффициент пропорциональности.

Однако и теория Реттингера, и теория Кика, и другие теории измельчения, учитывающие только механические явления при деструкции материала, не позволяют рассчитать минимальную необходимую работу измельчения материала. По расчетам на основе этих теорий КПД всех размалывающих устройств составляет величину от нескольких долей процента до нескольких процентов в лучшем случае. Это



объясняется тем, что при размоле кроме механического разрушения материала имеет место целый ряд явлений химического, термического, электрического, светового характера. Кроме того, происходит аккумуляция энергии в различном виде в частицах твердого тела после размола. Эти процессы тем интенсивнее, чем глубже размол.

Исследование на калориметрических мельницах показали, что часть механической энергии аккумулируется измельченными твердыми телами. В первых исследованиях Шеллингера доля затраченной энергии, которая не была обнаружена в виде тепловой, составила 10...19 % [123].

Исследования, выполненные в Институте горного дела Словацкой АН [124] и в Институте обогащения АН ГДР [125], подтверждают данные Шеллингера. Общая аккумулированная энергия зависит от условий измельчения: интенсивности, подвода энергии, свойств вещества, длительности, однако и в самых оптимальных условиях она не превышает 25...30 % от подведенной энергии [126].

Стайрманд, используя ранее предложенный метод определения минимальной работы дробления – «свободное дробление», провел сравнение эффективности ряда промышленных измельчительных аппаратов с различными типами воздействия на измельченный материал [127]. Анализ результатов приводит к выводу о том, что известные мельницы работают неэффективно. Возможно увеличение коэффициента энергетической эффективности в 5...10 раз. Для этого необходимо выполнить два условия:

- мельница должна измельчать в условиях, максимально приближенных к условиям «свободного дробления»<sup>1</sup>;
- полученный продукт (мелочь) следует немедленно удалять из зоны дробления.

Заметим, что этим условиям отвечают аппарат ударно-скалывающего типа «дезинтегратор» и в наименьшей степени шаровая барабанная мельница ШБМ.

---

<sup>1</sup> «Свободное дробление» осуществляется раздавливанием слоя частиц определенного размера толщиной в одну частицу под прессом между двумя плоскими поверхностями. Зная силу воздействия и путь продвижения сдавливающей плоскости, легко определить удельный расход энергии на измельчение данного вещества от исходного до конечного размера частиц.



Современная техника измельчения основана на двух процессах диспергации:

- в первом частица или агломераты частиц подвергаются дроблению между двумя поверхностями, чаще всего при сдвиге (дробление раздавливанием);
- во втором – частица разрушается при соударении с твердой поверхностью (свободное ударное действие).

В исследованиях немецких ученых показано, что прочность частиц и работа, необходимая для их разрушения, возрастают с уменьшением размеров частиц [128, 129]. Этот факт объясняется тем, что с уменьшением размера частицы, зависящего от физико-механических свойств материала, наблюдается переход от хрупкого разрушения к вязкому. На опытных кривых деформации это прослеживается в переходе от кривых с пиками, характерными для хрупкого разрушения, к кривым с медленным плавным подъемом.

Ниже приведены следующие данные для нижнего предела размола частицы (мкм) [128], когда прекращается хрупкое разрушение и начинается пластическое течение материала, полученные в одинаковых условиях эксперимента (табл. 2.2.).

Таблица 2.2

**Нижний предел размеров частиц  $\delta$ , мкм, при переходе от хрупкого разрушения при размоле к пластической текучести**

| №<br>п/п | Вещество          | $\delta$ , мкм | №<br>п/п | Вещество            | $\delta$ , мкм |
|----------|-------------------|----------------|----------|---------------------|----------------|
| 1        | Калийная соль KCl | 150...250      | 6        | Мрамор              | 10...15        |
| 2        | Сахар (песок)     | 50...100       | 7        | Известняк           | 5...9          |
| 3        | Бурый уголь       | 23...35        | 8        | Кварц               | 4...6          |
| 4        | Каменный уголь    | 20...30        | 9        | Кристаллический бор | 2...3          |
| 5        | Аморфный бор      | 10...20        | 10       | Карбид бора         | 2...3          |

Одновременно микроскопические наблюдения свидетельствуют о том, что в переходной области еще имеются следы хрупкого разрушения, но образующиеся частицы уже включаются в процесс агрегирования (наблюдается своеобразное равновесие).



Порядок размера частиц в начале пластического течения близок к теоретическому пределу дробимости частиц [129], рассчитанному в соответствии с теорией развития трещин по Гриффитсу.

Анализируя совокупность процессов при диспергировании, Ребиндер показал, что работа диспергирования складывается из упругой деформации, пластической деформации, разделения на более мелкие части и работы на придание разделяющимся частям кинетической энергии:

$$A = A_{\text{упр}} + A_{\text{пл}} + A_{\text{пов}} + A_{\text{к}}. \quad (2.8)$$

Полезной является работа образования поверхности. Работа, затраченная на пластическую деформацию, может быть значительно больше работы образования поверхности в  $10 \dots 10^3$  раз и согласно современным представлениям [130, 184, 185] расходоваться на образование в твердом теле различного рода дефектов. Исходя из (2.8) Ребиндер предложил эффективность процесса размалывания оценивать величиной

$$\eta = \frac{A_{\text{пов}}}{A_{\text{пов}} + (A_{\text{упр}} + A_{\text{пл}})}. \quad (2.9)$$

Как уже указывалось, в этом случае  $\eta = 0,01 \dots 1,0 \%$ .

Однако с точки зрения химии дефектных кристаллов твердое тело, содержащее повышенное по сравнению с равновесным количество дефектов, имеет более высокую реакционную способность. Таким образом, если в последующих процессах запасенную твердым телом энергию удастся реализовать, то КПД надо относить не к процессу диспергирования, а к процессу активации в целом. КПД процесса активации уже следует выразить уравнением [131]

$$\eta = \frac{A_{\text{пов}} + A_{\text{пл}}}{A_{\text{пов}} + (A_{\text{упр}} + A_{\text{пл}})}. \quad (2.10)$$

По оценкам ряда авторов, эта величина может составлять  $5 \dots 10 \%$  [131].

Ниже на рис. 2.1 дано сравнение КПД процессов образования дефектов и поверхности. Из рисунка видно, что энергия, расходуемая на



образование дефектов, в 40...50 раз больше, чем энергия, расходуемая на образование поверхности.

Изложенные выше основы теории диспергации сформулированы при использовании материалов монографии Е.Г. Аввакумова «Механические методы активации химических процессов» [133].

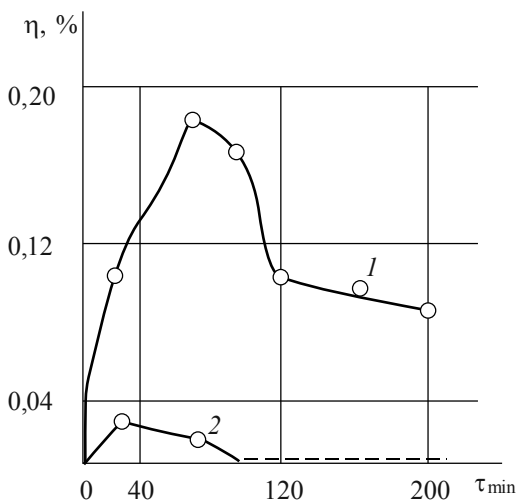


Рис. 2.1. КПД процессов образования дефектов 1 и поверхности 2 [17]

Автор [133] делает вывод: «Таким образом, обработка в измельчительных аппаратах является не только способом получения вещества в мелкодисперсном состоянии, но и способом генерации различного рода структурных дефектов в объеме и активных состояний на поверхности кристалла, повышающих реакционную способность твердых тел».

Аввакумов подробно рассматривает механизмы инициирования механохимических реакций, закономерности структурных и химических изменений в твердых телах, происходящих под влиянием механической активации, механохимические реакции твердых тел с газами и жидкостями, механохимические реакции в смесях твердых веществ, механохимический синтез в многокомпонентных системах.

Особый интерес вызывает проведенный автором анализ физико-химических явлений, сопровождающих диспергирование твердых тел.



### Выделение тепла

При диспергации твердых тел большая часть работы разрушения тела, совершаемая против сил трения, освобождается в виде тепла. В локально ограниченных точках поверхности температура может достигать весьма больших значений, равных температуре плавления материала твердого тела. Для оценки температур, возникающих на контакте трущихся тел, Боуден [134] предложил формулу

$$\Delta T = \frac{\mu P V}{4a} \frac{1}{k_1 + k_2}, \quad (2.11)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $P$  – сила давления, действующая на поверхность контакта;  $V$  – скорость скольжения;  $a$  – радиус контактной области;  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты теплопроводности трущихся тел.

Современные представления о механизмах разогрева связаны с пластическим течением твердых тел [135]. Согласно этим представлениям разогрев происходит тогда, когда тепло, выделяющееся при пластической деформации, не успевает отводиться из зоны деформации вследствие неоднородности последней по объему деформируемого тела, в то время как при однородной деформации тело нагревается однородно и незначительно. Экспериментальные данные согласуются с приведенным выше механизмом разогрева (табл. 2.3).

Таблица 2.3

#### Результаты по определению эффективных температур на поверхности раскола [21]

| Тип реакции     | Вещество          | Число разложившихся монослоев | Твердость материала, кг/м <sup>2</sup> ·10 <sup>6</sup> | Эффективная температура, К |
|-----------------|-------------------|-------------------------------|---|----------------------------|
| Эндотермическая | CaCO <sub>3</sub> | 0,09                          | 160   | 1523                       |
| Эндотермическая | PbCO <sub>3</sub> | 2,0                           | 845   | 1123                       |
| Экзотермическая | NaN <sub>3</sub>  | 0,02                          | 10  | 1273                       |
| Экзотермическая | PbN               | 10,0                          | 130   | Отрицательное значение     |





Уракаев [137] выполнил теоретическую оценку температурного пика на контакте трущихся твердых частиц для скоростей движения мелющихся тел 5...10 м/с, имеющих место в планетарных мельницах.

Получена формула

$$\Delta T_{\max} = \frac{\rho^{0,54} \left( \rho_1 L_2^3 + \rho_2 L_1^3 \right) (\theta_1 + \theta_2)^{1,4\xi W^{1,07}}}{\left[ (L_1 + L_2)^5 (\rho_1 \rho_2)^2 c_1 c_2 \lambda_1 \lambda_2 \right]^{0,25} (\theta_1 + \theta_2)^{2,15}}, \quad (2.12)$$

где  $\rho$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  – соответственно плотности мелющегося тела и реагирующих веществ;  $L_1$  и  $L_2$  – средняя кривизна частиц 1 и 2  $\left( L = \frac{1}{R'} \right$ ,

$R$  – радиус частицы);  $\theta$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\bar{\theta}$  – податливости шара, обрабатываемых частиц и смеси веществ  $\left( \theta = \frac{4(1-\nu)^2}{E}, \bar{\theta} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}; E \right.$  – модуль

Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона);  $c$  и  $\lambda$  – удельная теплоемкость и теплопроводность частиц;  $\xi$  – коэффициент трения частиц 1 и 2;  $W$  – скорость соударения шаров со стенкой барабана.

По расчетам Уракаева, для измельчения NaCl при частоте вращения планетарной мельницы  $10 \text{ с}^{-1}$   $\Delta T_{\max} = 1035 \text{ К}$ .

### Появление высоких давлений

При исследовании фазовых переходов, происходящих при измельчении и вызываемых высоким давлением, Дахиль, Роу и другие исследователи заметили, что между этими явлениями много общего. Было высказано предположение о том, что на контакте трущихся частиц возникают очень высокие давления, как показала оценка, порядка  $(15...18)10^8 \text{ Па}$  [138]. Расчет сил при размалывании твердых кристаллов подтвердил возможность развития давлений до  $20 \cdot 10^8 \text{ Па}$ . Позднее Толочко, Шеромов и другие исследователи обнаружили еще более высокие давления.



Как и высокие температуры, высокие давления могут рассматриваться в качестве причины возникновения дислокаций и дефектов (первичных микротрещин) и, следовательно, служат основными причинами аккумуляции энергии в частицах, что приводит к увеличению реакционной способности размолотого топлива.

### Ускорение процессов переноса

В результате пластической деформации твердых тел происходит ускорение процессов массопереноса в них двумя путями:

- твердое вещество при пластическом течении приобретает свойства «квазижидкости», создаются благоприятные условия для всех видов подвижностей, необходимых для интенсификации за счет молярного переноса диффузионных процессов;
- молекулярная диффузия: в результате пластической деформации твердых тел происходит разупорядочение кристаллов, увеличивается свободный объем, возникают вакансии анионов или катионов, растет интенсивность беспорядочного теплового движения. Разное увеличение числа вакантных мест и движение их в градиентах упругих напряжений приводят к возрастанию электронной и ионной проводимости, а также к ускорению процессов диффузии.

Эти явления обнаружили Дьюла и Хартли, позднее их подтвердил Степанов. Была разработана модель интенсификации диффузии при измельчении [139], получено экспериментально подтвержденное уравнение интенсификации диффузии [140]:

$$\frac{D_p}{D} = 1 + \frac{\eta \tau_v D_v}{D} \varepsilon, \quad (2.13)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;  $D_p$  – коэффициент диффузии при размельчении;  $D_v$  – коэффициент диффузии вакансий;  $\tau_v$  – время жизни вакансий;  $\varepsilon$  – скорость деформации.

Экспериментально установленное время жизни вакансий  $\tau_v$  до 200 с.

### Электрические явления

Возникающие при расколе твердых тел вновь образованные поверхности несут на себе электрический заряд, который не однородный,



а имеет микро- и макрорельеф, отражающий существование различного типа дефектов в твердых телах. Исследование пространственного распределения заряда, его плотности методами зондирования [141] позволяет выяснить природу активных элементов поверхности.

Под влиянием пластической деформации происходит электризация поверхностей диэлектриков. Считается, что этот эффект обусловлен образованием разности потенциалов из-за движения заряженных дислокаций. Возникающий под действием удара или деформации потенциал, как это показано Урусовской [142], коррелирует с пластичностью кристалла: чем кристалл пластичнее, тем потенциал выше, и наоборот.

### **Экзоэмиссия и механоэмиссия электронов**

В твердых телах в момент и после механической обработки наблюдаются явления экзо- и механоэмиссии электронов. Электроны экзоэмиссии, затухающие весьма медленно после механической обработки, имеют энергию выше электронвольта, электроны же механоэмиссии (механоэлектроны) возникают в основном при разрушении диэлектриков и обладают энергией в десятки киловольт. Впервые они были обнаружены Дерягиным, Кротовой и Карасёвым [143].

Относительно механизма экзоэмиссии существует несколько гипотез. Условно их можно разбить на две группы:

- гипотезы, объясняющие экзоэмиссию «внутренними» свойствами металлов;
- гипотезы, объясняющие экзоэмиссию внешними факторами – процессами сорбции газов на новых поверхностях или химическими реакциями.

Между интенсивностью эмиссии и химической активностью металлов существует прямая связь.

### **Триболюминесценция**

При деформировании, разрушении и трении твердых тел возникает интенсивная люминесценция. Свечение может быть вызвано прямым механическим воздействием [144], тепловым возбуждением [145], а также рядом других причин (рекомбинация заряженных центров при развитии микропластической деформации, возникновение электрических полей и т. п.).



## 2.2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ УГЛЯ

Диспергирование углей является частной задачей в общей проблеме диспергирования твердых тел. Диспергирование углей, подчиняясь общим закономерностям диспергирования твердых тел, отличается в деталях. Это объясняется тем, что угли – это органические вещества с молекулами, насчитывающими сотни атомов, с циклическими структурами, объединенными в сетевую структуру, со слабыми периферическими кислородными и гидроксильными связями.

В Институте горючих ископаемых Минуглепрома СССР в продолжение нескольких лет проводились исследования физических и химических процессов, происходящих при механическом диспергировании углей. Результаты исследований были опубликованы в ряде работ [130, 157, 180, 181, 183], и часть материалов была оформлена в виде докторской диссертации Т.М. Хренковой «Химические превращения углей при механическом диспергировании» [146].

Исследования химических превращений углей были проведены на углях Кузнецкого и Канско-Ачинского бассейнов [147]. Для получения тонкоизмельченных проб использовались измельчители: вибромельница и дезинтегратор УДА (универсальный дезинтегратор-активатор конструкции СТКБ «Дезинтегратор», г. Таллинн).

Для оценки свойств и структуры углей при их измельчении применялся комплекс физико-химических методов исследования: спектральные методы анализа ИК, ЯМР (ПМР), ЭПР, УФ-спектроскопия в сочетании с химическими: методы дериватографии, гельпроникающей хроматографии, рентгеноструктурного фазового анализа и атомного радиального распределения, исследования электрофизических свойств и эмиссии электронов и ряд других методов.

Исходный фракционный состав угля, диаметр и вес мелющих шаров, вес загружаемого угля, амплитуда колебаний вибромельницы и продолжительность измельчения влияли на дисперсный состав углей при измельчении.

При измельчении углей в дезинтеграторе исследовалось изменение дисперсного состава порошков в зависимости от скорости вращения ротора, которая составляла от 4000 до 16 000 об/мин. Максимальное содержание частиц угля минимальных размеров (5 мкм) в



тонкоизмельченных пробах и наименьшие значения минимального и максимального радиусов частиц получены при скоростях, равных 8000 об/мин.

При механическом диспергировании угля в вибромельнице и УДА наблюдается изменение его физико-химических свойств: частицы угля уменьшаются до микронных размеров, увеличивается удельная поверхность на один-два порядка.

В настоящей работе показано, что измельчение приводит к возрастанию реакционной способности углей по отношению к окислителю (перманганату калия в щелочной среде), причем величина этого показателя зависит от среды измельчения и особенностей структуры угля [148, 149, 150]. Как показывают данные ЭПР, при измельчении углей на вновь образующихся поверхностях возникают активные центры разной природы, способные инициировать протекание химических реакций. Проведение экспериментов с температурой кипения азота показало, что при диспергировании коксового угля концентрация парамагнитных центров (ПМЦ) возросла примерно в 2,5 раза, а их прирост составил  $1,6 \cdot 10^{19}$  ПМЦ/ч. Измельчение угля при комнатной температуре давало прирост парамагнитных центров  $4,6 \cdot 10^{18}$  ПМЦ/ч. Ширина линии сигнала уменьшалась с увеличением времени вибропомола от 6,5 до 5,0 ЭПР. Изменялся также  $g$ -фактор. Эти данные указывают на наличие разных типов ПМЦ в углях. Низкая температура дает возможность фиксировать короткоживущие радикалы; при комнатной температуре они гибнут. ИК-спектры угля, диспергированного на воздухе при низкой температуре, показывали, что увеличение концентрации ПМЦ сопровождалось появлением в них полосы поглощения при  $880 \text{ см}^{-1}$ , относящейся к колебаниям перекисной группы  $-\text{O}-\text{O}-$ , и свидетельствовали о взаимодействии новых макрорадикалов с кислородом воздуха с образованием перекисных радикалов, которые реагируют с соседними молекулами и образуют гидроперекиси. Дальнейшие превращения приводят к возникновению различных кислородных функциональных групп, характер которых зависит от положения неспаренного электрона. ИК-спектры фиксируют образование первичных ( $-\text{CH}_2-\text{OH}$ ) и вторичных ( $>\text{CH}-\text{OH}$ ) спиртовых групп, указывающих на то, что неспаренный электрон находится у первичного и вторичного углеродного атома.



При низких температурах происходит разрыв C – C связей в алифатических структурах. Образующиеся при этом радикалы окисляются и дают начало гидроперекисным и спиртовым группам на первичном и вторичном атомах углерода. Результаты экспериментов подтверждают радикальный характер механохимических превращений углей [151, 152, 153].

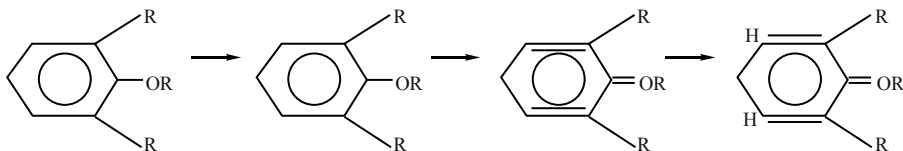
При вибропомоле гуминовых кислот бурого и тощего углей в среде аргона и воздуха изменялось атомное отношение  $\frac{C}{H}$  в их составе, уменьшалось содержание кислорода. ИК-спектры диспергированных гуминовых кислот бурого угля показывали ослабление водородной связи, уменьшение содержания хиноидных групп и увеличение интенсивности полосы фенольных гидроксидов ( $1240 \text{ см}^{-1}$ ). Полученные экспериментальные данные по влиянию механического воздействия на гуминовые кислоты, являющиеся ароматическими высокомолекулярными полуфункциональными оксикислотами, по структуре близкими к углям, свидетельствовали о протекании процессов деструкции как в среде аргона, так и в среде воздуха по C – O, C – S, и C – H связям с уменьшением молекулярной массы кислот тощего угля и увеличением полидисперсности молекулярных масс бурого угля [154].

Изучение свойств и строения тонкоизмельченного бурого угля на примере Ирша-Бородинского месторождения Канско-Ачинского бассейна показало, что после измельчения угля на воздухе не только увеличивалась удельная поверхность, но и изменялся его химический состав.

Совокупность результатов исследований позволяет сделать заключение, что при тонком измельчении бурого угля происходит разрушение ароматических структур с образованием алифатических (гидроароматических) и протекают реакции гидрирования. Механическое диспергирование органических веществ углей вызывает разрыв химических связей и образование свободных радикалов. Анализ полученных экспериментальных данных приводит к выводу о протекании процесса механодеструктуризации. Возникающие при этом новые атомные группировки связаны с разрушением углерод-кислородных и углерод-углеродных связей. Образуются неопределенные двойные связи и происходит переалкилирование конденсированных ароматических

ядер и образование летучих веществ и растворимых продуктов [155]. Возрастание относительного содержания ароматических конденсированных структур с двумя, тремя, четырьмя соседними незамещенными атомами водорода служит доказательством того, что в процессе механодеструктуризации происходит отрыв боковых радикалов от ароматического ядра.

Наиболее вероятное направление образования хиноидных групп представляется реакцией:



Проводилось исследование эмиссии электронов высоких энергий (ЭЭВЭ) в процессе их вибрационного измельчения в вакууме. Обнаружено, что диспергирование углей сопровождается возникновением потока ЭЭВЭ, величина которого зависит от стадии метаморфизма угля. Максимальные значения величины потока ЭЭВЭ соответствуют углям средней стадии метаморфизма.

Отмечена связь между интенсивностью потока ЭЭВЭ, напряженностью электростатического поля и величиной удельного электросопротивления углей. Наибольшие значения величины потока ЭЭВЭ и напряженности электростатического поля приходятся на газовый, жирный, коксовый угли. Угли, обладающие лучшей проводимостью в аналогичных условиях эксперимента, либо дают меньший поток ЭЭВЭ (тощий уголь), либо вообще не обнаруживают явления ЭЭВЭ (донецкий антрацит). Было установлено, что пребывание свежеизмельченного угля на воздухе приводит к резкому снижению потока электронов при последующем диспергировании [146].

Повышение химической активности углей при тонком измельчении связано с особенностями изменения их строения: увеличением удельной поверхности, аморфизацией вещества, появлением активных центров разной природы на вновь образованной поверхности, возрастанием атомного соотношения  $\frac{H}{C}$ , увеличением низкомолекулярных продуктов (повышение растворимости угля) и возрастанием содержания



хиноидных групп, обогащением фрагментов структуры углеводородными группами за счет реакций гидрирования и увеличением относительного содержания водорода, приходящегося на гидроароматические структуры, снижением температуры максимума разложения вследствие реакций деструкции [146].

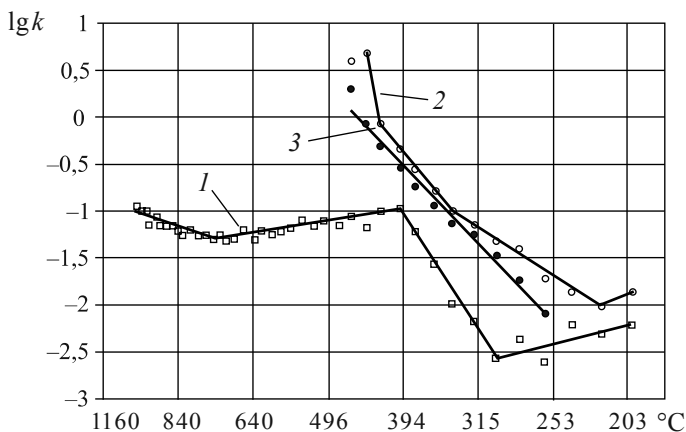


Рис. 2.2. Зависимость константы скорости реакции от температуры:

- 1 – каменный уголь (Сахалин), размер частиц 4...6 мм;  
 2 – каменный уголь (Сахалин), пропущенный через дезинтегратор 2 раза; 3 – каменный уголь (Сахалин), переработанный в кавитаторе, размер частиц <20 мкм

Таким образом, можно считать доказанным теоретически и экспериментально, что сложные физико-химические процессы диспергирования минерального сырья, в том числе твердого угольного топлива, сопровождаются активацией образующихся частичек. Активация проявляется в образовании на поверхности частиц особых центров, несущих термические, электрические, механические заряды. Эти центры являются следствием внутренних деформаций и развития микротрещин. Общей причиной активации служит аккумуляция в частицах части энергии диспергирования [182 – 184].

На рис. 2.2 представлены результаты обработки дериватограмм для каменного угля марки «Д» Быковского разреза (о. Сахалин). Из сравнения дериватограмм следует, что реакционная способность порошка





угля, размолотого на дезинтеграторе, значительно превосходит реакционную способность дробленки того же самого угля. Кроме того, ИКЖТ исследуемого угля на стадии, когда влага из него удалена, обладает практически такой же высокой реакционной способностью, что и угольный порошок.

### **2.3. ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕЗИНТЕГРАТОРАХ**

Многолетняя работа с измельчающими аппаратами показала основные недостатки мельниц различных типов:

- грубое измельчение (150...300 мкм);
- большой удельный расход электроэнергии на 1 т продукции (порошка) (75...90 кВт · ч);
- высокая металлоемкость;
- большой износ рабочих органов (до 110...130 г/т продукции);
- крупные габариты;
- сложность ввода и вывода материала.

В наибольшей степени эти недостатки, за исключением тонины помола, присущи ШБМ мокрого измельчения. Крупными недостатками также обладают вибрационные аппараты и аппараты стержневого типа.

Диспергирование твердых тел возможно при применении струйных аппаратов. Теория этих процессов и возможности использования рассмотрены в работе [156].

Среди аппаратов, дающих наибольшую активацию угольного порошка в помоле (10...12 % от подведенной энергии), выделяются дезинтеграторы или дископальцевые быстроходные мельницы ударно-скалывающего действия. Дезинтеграторы обладают наименьшей металлоемкостью и энергоемкостью (17...19 кВт · ч/т угля) по сравнению с другими видами мельниц, а также удовлетворительной тониной помола (20...30 мкм по моде, уголь).

Поэтому именно дезинтегратор был выбран как основной измельчитель в технологической схеме приготовления ИКЖТ [157].

## 2.3.1. ДЕЗИНТЕГРАТОР

Дезинтегратор был предложен Карром в 1859 г. За период до 1949 г. конструкция машины почти не изменилась. Современный дезинтегратор состоит из двух вращающихся во взаимно противоположные стороны дисков с круглыми пальцами (билами), которые расположены в каждом диске по кругу в несколько рядов перпендикулярно к плоскости вращения и образуют корзины. Пальцы одной корзины располагаются между двумя рядами пальцев другой. Диски корзин насажены на валы, расположенные на одной геометрической оси, каждый с самостоятельным приводом (рис. 2.3).

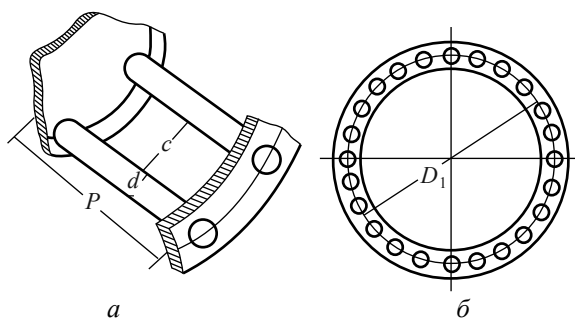


Рис. 2.2. Детали корзины дезинтегратора:

*a* – два средних пальца круга; *б* – круг пальцев корзины

Автором современной конструкции дезинтегратора является И.А. Хинт [157], который предложил также и методику его расчета.

Дезинтеграторы Хинта первоначально предназначались для переработки песка, но позднее различные авторы путем доработок приспособили их для переработки других материалов, в частности угля. Длительный конструкторский опыт в разработке дезинтеграторов для конкретных угольных материалов показывает, что методика И.А. Хинта расчета дезинтеграторов вполне применима и для этих случаев.

Максимальная производительность дезинтегратора может быть рассчитана по формуле

$$V = \frac{\pi^2 b a^2 D_1 n}{a + d}, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (2.14)$$



Эта формула подтверждает высокую производительность дезинтегратора. При использовании мощных электродвигателей производительность дезинтегратора доводится до значений в соответствии с формулой (2.14), однако для практических целей рекомендуется формула

$$M = \pi b a^2 n k, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (2.15)$$

В этих формулах:  $V$  – производительность дезинтегратора,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $b$  – длина пальцев внутреннего круга,  $\text{м}$ ;  $a$  – расстояние между пальцами во внутреннем круге,  $\text{м}$ ;  $D_1$  – диаметр круга,  $\text{м}$ ;  $d$  – диаметр пальца,  $\text{м}$ ;  $n$  – число оборотов внутренней корзины,  $\text{об/мин}$ ;  $k$  – число пальцев внутреннего (наименьшего) круга.

В конструкции дезинтегратора, где во всех кругах пальцев корзин расстояние между пальцами примерно одинаковое, внутренний круг, имеющий меньший диаметр по сравнению с другими кругами пальцев корзин, пропускает меньшее количество материала, и поэтому максимальную производительность дезинтегратора следует рассчитывать по внутреннему кругу пальцев по формуле (2.15).

### Конструктивные размеры дезинтегратора

Частица (песчинка), попав на первый круг пальцев, получает скорость, соответствующую скорости пальца, и с этой скоростью она вылетает из круга. При этом ее путь направлен в одну сторону с вектором скорости того пальца, от которого она ушла, и пересекает траекторию движения второго ряда пальцев (движущихся в противоположном направлении). Проскочит ли песчинка второй круг, не коснувшись пальцев, если она получит от первого круга соответствующую скорость?

На рис. 2.3 показано минимальное расстояние  $P_1P_2$  между центрами второго ряда пальцев, если бы второй ряд пальцев был неподвижен. Выведем формулу, по которой определяется расстояние  $P_1P_2$ . Обозначим радиус пальцев буквой  $r$  и радиус песчинки буквой  $\rho$ . Пусть песчинка касается одного из пальцев второго круга в точке  $M_1$  и следующего за этим пальца в точке  $M_2$ . Пусть прямая  $KL_1AL_2$  изображает траекторию центра песчинки. Она пересечет соединяющую центры пальцев линию  $P_1P_2$  в точке  $A$ . Обозначим:  $O$  – центр

вала дезинтегратора,  $R_1$  – радиус центров пальцев первого круга и  $R_2$  – радиус центров пальцев второго круга. Песчинка, попавшая на точку  $D$  пальца  $P$  первого круга, получает скорость, равную скорости движения пальца, и начинает вследствие центробежной силы удаляться от траектории движения первого круга пальцев и двигаться по прямой  $KL_1AL_2$ , которая перпендикулярна к прямой  $OK$ . Путь песчинки на рис. 2.4 показан пунктирными линиями; пальцы второго круга соприкасаются с этими линиями в точках  $M_1$  и  $M_2$ .

Поэтому  $L_1P_1 \perp KL_1AL_2$  и  $L_2P_2 \perp KL_1AL_2$ .

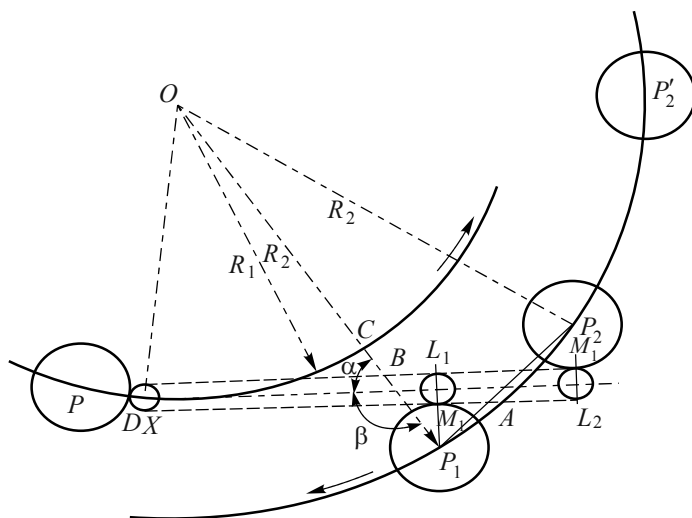


Рис. 2.4. Схема движения песчинки между первым и вторым кругом пальцев дезинтегратора

Учитывая геометрические соотношения (рис. 2.3) и подобие между  $\Delta BKO$  и  $\Delta BP_1L_1$ , получим

$$P_1P_2 = \frac{2R_2(r + \rho)}{\sqrt{R_1^2 - (R_1 + r + \rho)^2}}. \quad (2.16)$$

Второй круг пальцев в действительности не стоит на месте, а движется с определенной угловой скоростью в противоположном движе-



нию частицы направлению, поэтому действительное минимальное расстояние  $P_1P_2$  больше.

Пусть  $n_1$  – число оборотов первого круга пальцев и  $n_2$  – число оборотов второго круга имеют скорость

$$V_1 = 2\pi n_1 R_1. \quad (2.17)$$

Действительное минимальное расстояние между пальцами второго круга, при котором частица теоретически не имеет возможности проскочить через второй круг пальцев, не задевая их, будет равно

$$P_1P'_2 = P_1P_2 + P_1P'_2. \quad (2.18)$$

Скорость движения второго круга будет равна

$$V_2 = 2\pi n_2 R_2. \quad (2.19)$$

Время, необходимое для прохождения частицей пути  $L_1L_2$ , равно

$$\Delta\tau = \frac{P_2P'_2}{2\pi n_2 R_2}, \text{ с.} \quad (2.20)$$

Окончательно на основе сказанного выше и формулы (2.20) получим

$$P_1P'_2 = \frac{2R_2(r+\rho)}{\sqrt{R_2^2 - (R_1 + r + \rho)^2}} \left[ 1 + \frac{(R_1 + r + \rho)n_2}{n_1 R_1} \right]. \quad (2.21)$$

При  $n_2 = 0$  будем иметь дисмембратор.

При вычислении значения  $P_1P'_2$  по формуле (2.21) используются значения  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $r$  двух соседних кругов пальцев. По этим данным для первого и второго круга получают значение  $P_1P'_2$  для второго круга, по данным второго и третьего кругов – значение  $P_1P'_2$  третьего круга и т. д. Первый внутренний круг пальцев фактически не принимает участия в обработке материала.

Методика расчета геометрических размеров дезинтеграторов была опробована при разработке серии дезинтеграторов Опытного завода

г. Таллинна (рис. 2.5). Данные одного из них: длина пальцев первого внутреннего круга 90 мм, длина пальцев остальных кругов 110 мм, диаметр пальцев 36 мм.

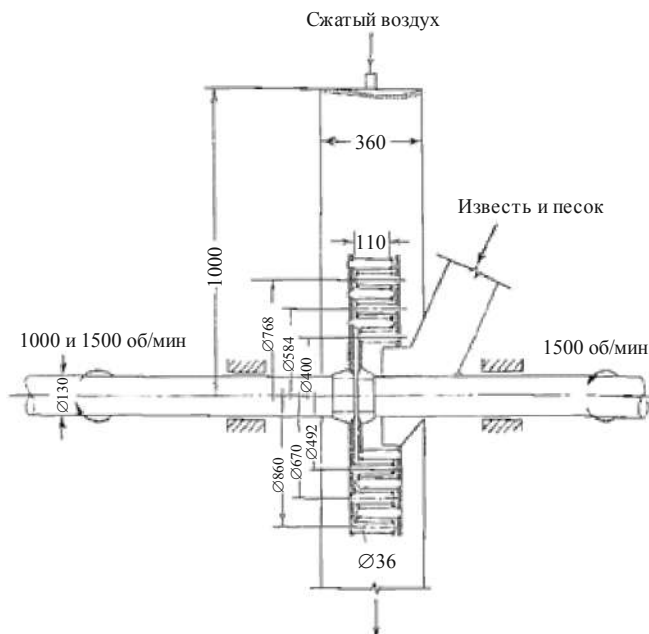


Рис. 2.5. Схема дезинтегратора Опытного завода

Приводим диаметр кругов пальцев и число их в каждом круге.

| Круг пальцев | Диаметр, мм | Число пальцев |
|--------------|-------------|---------------|
| I            | 400         | 10            |
| II           | 492         | 20            |
| III          | 584         | 28            |
| IV           | 676         | 32            |
| V            | 768         | 32            |
| VI           | 860         | 36            |

### Энергопотребление дезинтегратором

В табл. 2.4 представлены результаты исследований энергопотребления дезинтегратором Опытного завода (см. рис. 2.5).

Исследуемый дезинтегратор (рис. 2.6) испытывался на различных режимах при различной загрузке и разном обрабатываемом материале.

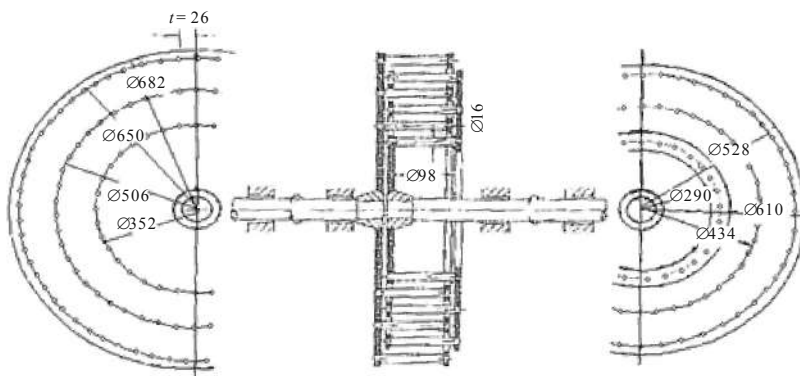


Рис. 2.6. Схема исследуемого дезинтегратора

Анализ данных табл. 2.4 показывает, что результаты исследования энергопотребления могут быть обобщены в виде зависимости

$$\lg E = A + BG, \quad (2.22)$$

где  $E$  – энергопотребление дезинтегратором, кВт · ч;  $G$  – количество материала, обрабатываемого в дезинтеграторе, т/ч.

Анализ работы теоретического дезинтегратора позволил вывести формулу энергопотребления:

$$E_1 = \ell \cdot 0,446 \cdot 10^{-6} n_k^2 D_k^2 - \left( \frac{a+d}{P_1 P_2'} \right)_{\text{ср}} G, \quad \text{кВт} \cdot \text{ч}. \quad (2.23)$$

Однако эта формула была точной только для дезинтеграторов, мало отличающихся по размерам и режимам работы. Поэтому были введены в формулу (2.23) некоторые эмпирические поправки, что позволило

расширить ее для расчета энергопотребления дезинтеграторами производительностью вплоть до 30 т/ч.

Из анализа фактических данных было получено

$$E = kG, \quad (2.24)$$

И окончательно с учетом теоретической зависимости формула энергопотребления имеет вид

$$E = k_1 \sqrt{\left( \frac{P_1 P'_2}{a + d} \right)_{\text{cp}}} \frac{1}{G} n_k^2 D_k^2. \quad (2.25)$$

По результатам измерений энергопотребления различных дезинтеграторов среднее значение  $k_1$  можно принять равным  $k = 1,4 \cdot 10^{-6}$ . При этом формула энергопотребления примет вид

$$E = 1,4 \cdot 10^{-6} \sqrt{\left( \frac{P_1 P'_2}{a + d} \right)_{\text{cp}}} \frac{1}{G} n_k^2 D_k^2. \quad (2.26)$$

Если число оборотов корзин равно, т. е.  $n_1 = n_2 = n$ , то

$$n_k^2 D_k^2 = n^2 D_k^2. \quad (2.27)$$

При этом  $D_k^2$  находят по формуле

$$D_k^2 = 2 \sum_{i=1}^{i=N-1} D_i^2 + D_N^2, \quad (2.28)$$

где  $N$  – число кругов пальцев дезинтегратора.

Величину  $\left( \frac{P_1 P'_2}{a + d} \right)_{\text{cp}}$  рассчитывают по формуле

$$\left( \frac{P_1 P'_2}{a + d} \right)_{\text{cp}} = \frac{1}{N-1} \left\{ \frac{P_1 P'_{2\text{II}}}{(a+d)_{\text{II}}} + \frac{P_1 P'_{2\text{III}}}{(a+d)_{\text{III}}} + \dots + \frac{P_1 P'_{2N}}{(a+d)_N} \right\}, \quad (2.29)$$

где римские цифры обозначают круги пальцев;  $N$  – последний круг.





Таблица 2.4

## Исследование энергопотребления исследуемым дезинтегратором

| Местоположение песка  | Количество оборотов корзины дезинтегратора в минуту | Количество песка, обработанного в дезинтеграторе, т/ч | Расход энергии на помол 1 т песка, кВт · ч | Степень нагрузки электродвигателей при помощи, % | Значение множителя $k$ в формуле (2.24), $k \cdot 10^6$ |
|-----------------------|---|---|--|--|---|
| Карьер завода «Кварц» | 1450  | 0,95  | 10,46                                      | 37   | 4,75  |
|                       |   | 1,12  | 9,95                                       | 30   | 4,55  |
|                       |   | 1,42  | 10,09                                      | 53   | 4,96  |
|                       |   | 1,99  | 9,29                                       | 68   | 4,23  |
|                       |   | 3,25  | 7,57                                       | 91   | 3,45  |
|                       | 950   | 1,57  | 3,32                                       | 20   | 3,52  |
|                       |   | 2,28  | 3,09                                       | 27   | 3,28  |
|                       |   | 3,20  | 2,81                                       | 33   | 2,98  |
|                       |   | 7,52  | 1,94                                       | 51   | 2,06  |
|                       |   | 17,1  | 1,43                                       | 91   | 1,52  |
|                       | 750   | 1,42  | 1,97                                       | 10   | 3,35  |
|                       |   | 1,9   | 1,85                                       | 13   | 3,14  |
|                       |   | 2,85  | 1,75                                       | 19   | 2,97  |
|                       |   | 6,22  | 1,33                                       | 31   | 2,26  |
|                       |   | 13,68   | 0,8  | 41   | 1,36  |
| Карьер «Рахумяэ»      | 1450  | 1,03  | 8,16                                       | 32   | 3,72  |
|                       |   | 2,74  | 6,14                                       | 82   | 2,79  |
|                       | 950   | 2,61  | 3,28                                       | 30   | 3,42  |
|                       |   | 5,07  | 2,21                                       | 42   | 2,35  |
|                       |   | 8,76  | 1,6  | 60   | 1,7   |
|                       |   | 19,5  | 1,13                                       | 102  | 1,2   |
|                       | 750   | 3,04  | 1,52                                       | 20   | 2,58  |
|                       |   | 5,7   | 1,16                                       | 29   | 1,97  |
|                       |   | 6   | 1,1  | 30   | 1,87  |
|                       |   | 9,74  | 0,78                                       | 36   | 1,33  |
|                       |   | 11,5  | 0,76                                       | 38   | 1,29  |
|                       |   | 16,7  | 0,59                                       | 45   | 1   |

Конструкции дезинтеграторов, описанные И.А. Хинтом, практически не изменились за пятьдесят лет. Отдельные изобретатели вносили



некоторые усовершенствования в схему подачи материала, отвода пыли и т. д. Проводилась работа по способу закрепления пальцев, увеличению межремонтного периода. Есть предприятия, производящие измельчители дезинтеграторного типа, например, фирма Desintegrator (<http://www.desid.html>). Промышленный дезинтегратор DESI-21 этой фирмы имеет следующие характеристики.

#### *Назначение*

Различные модификации DESI-21 позволяют измельчать сыпучие материалы с исходной крупностью частиц до 10...25 мм и твердостью по шкале Мосса 4...6 единиц до средней тонины 100...200 мкм. При применении DESI-21 в технологических линиях с сепараторами можно получать порошки с содержанием фракции менее 50 мкм свыше 90...95 % при производительности линии 7...15 т/ч.

#### *Технологические данные*

- Производительность в зависимости от модификации 7...40 т/ч.
- Мощность электродвигателей ( $n = 1500$  об/мин) 160, 200, 250, 315 кВт.
- Электропитание 3 кВт ~ 50 Гц / 380 В.
- Максимальные габаритные размеры  $330 \times 2020 \times 2120$  мм (длина, ширина, высота).
- Масса 9200 кг.

## **2.4. ПРОМЫШЛЕННЫЕ УГОЛЬНЫЕ ДЕЗИНТЕГРАТОРЫ**

Длительная работа с размолом угля в мельницах различного типа привела к выводу о том, что лучшим устройством для получения ультрадисперсного угля и одновременно для наиболее эффективной его активации является дезинтегратор.

Преодолеть предел пластической текучести углей практически невозможно при сухом помоле в мельницах, основанных на раздавливании угольных частиц или их истирании. Только в дезинтеграторах, где время контакта пальца и угольной частицы составляет тысячные доли секунды, а затем осколки частицы разлетаются в разные стороны, не взаимодействуя между собой, удастся получить значительную фракцию частиц с размерами менее 10 мкм. В дальнейшем частицы менее



5 мкм вообще не взаимодействуют с пальцами и транспортируемые воздушным потоком не агрегируются друг с другом.

Мокрый помол в ШБМ и стержневых мельницах позволяет получать фракцию ультрадисперсных частиц за счет разъединяющего действия жидкой фазы, но энергозатратен, а мельницы сложны и дороги. Кроме того, в жидкой среде практически отсутствуют механический удар и активация твердой фазы.

Дисперсность порошка неодинакова для различных углей. Лучше всего размалываются антрациты, порошок получается более мелким, а мода дисперсии смещается в сторону меньшего размера. Бурые угли при размоле дают более рыхлый порошок, частицы которого склонны к агрегированию. Для получения значительной мелкой фракции необходима обработка в смеси с водой в кавитаторе.

Наиболее уязвимым элементом дезинтеграторов являются пальцы. Абразивные свойства углей довольно высоки за счет карбонатов и карбидов в минеральной части топлива. Пальцы из обычной конструкционной стали служат не более нескольких десятков часов. Если время службы пальцев не превышает одного-двух десятков часов, то это свидетельствует о конструктивных ошибках дезинтегратора.

Для продления срока службы пальцев дезинтегратора их конструкция может быть биметаллической: сам палец изготавливается из сравнительно недорогой стали Ст4, на него напрессовывается чехол из легированной стали, противостоящий истиранию. Возможно изготовление пальцев из ковкого чугуна. Все эти меры, включая поверхностное упрочнение, способны обеспечить межремонтный период до 1000...1500 ч.

Для того чтобы увеличить межремонтный период дезинтегратора, необходимо изготавливать пальцы из специальных сталей. Так, дезинтегратор, пальцы которого были изготовлены из стали с добавкой 30 % кремния, проработал 7000 ч, после чего ревизия показала, что пальцы практически не были изношены. Спецстали обычно очень дороги и очень трудны в обработке. Это значительно удорожает дезинтегратор. Элементарные экономические расчеты показывают, что минимум расчетных затрат для дезинтегратора соответствует недорогим по стоимости пальцам и малому ремонтному времени на их замену. Особое внимание уделялось разработке таких пальцев. В результате отказались от индивидуального крепления пальцев в диске, приняли револьверную конструкцию закладки пальцев в диск, закрепление пальцев



производили общим крепежным диском на трех-четыре болтах с шайбами Гровера.

Такая конструкция позволяет производить смену пальцев за 30...40 мин при межремонтном периоде в 800...1000 ч; таким образом, ремонтное время составляет всего 0,1 % от периода эксплуатации, а коэффициент готовности  $k_T = 0,99$ .

Были внесены также изменения в конструкцию крепления дисков на полуосях для того, чтобы обеспечить их непрерывную работу в сутки не менее 20 ч. В конструкции Хинта, предназначенной для размола хрупких материалов, этот узел оказался не очень надежен для размола твердопластичных материалов, таких как уголь. Была также усилена фиксация соосности полуосей с дисками. Эти конструктивные изменения были тщательно отработаны на действующих дезинтеграторах. Отдельно рассматривался вопрос о взрывобезопасности угольной пыли в рабочем пространстве дезинтегратора. Был исследован поток воздуха через дезинтегратор и определено соотношение между массой пыли и массой воздуха, одновременно находящимися в корпусе дезинтегратора. Расчеты подтвердили, что это соотношение находится не в зоне взрывоопасности смеси угольной пыли с воздухом.

Ниже приведены примеры промышленных дезинтеграторов средней производительности, разработанных в соответствии с изложенными решениями.

Нами изучался вопрос об оптимальной скорости вращения рабочих органов дезинтегратора. На основе работ [133, 146, 147, 157], а также собственных наблюдений и анализе угольной пыли после дезинтегратора было принято, что оптимальная скорость вращения дисков дезинтегратора при оппозитном вращении (в относительном выражении) находится в диапазоне от 6000 до 10 000 об/мин при диаметре дисков 0,8...0,6 м. При этих условиях образуется максимальная фракция пыли диаметром менее 10 мкм и реакционная способность угля возрастает примерно на 20 %. Последнее выражается в снижении численного значения энергии активации и снижении температуры горения ВУТ при сохранении скорости реакции горения действующих веществ в производстве органоминеральных и полимерных соединений с уменьшением времени протекания реакции.

Фотографии некоторых лабораторных и промышленных дезинтеграторов и дисмембраторов приведены ниже (рис. 2.7 и 2.8). На этих



рисунках показан лабораторный дисмембратор производительностью 100 кг порошка в час. В отличие от дезинтеграторов у дисмембраторов нет оппозитного вращения корзины: у них вращается одна корзина, а вторая остается неподвижной. Размол в этих аппаратах более крупный, чем в дезинтеграторах.

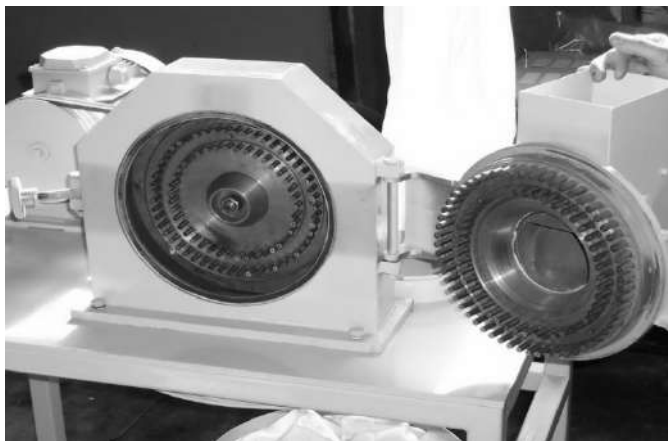


Рис. 2.7. Дисмембратор лабораторный, производительность по углю 100 кг/ч



Рис. 2.8. Дезинтегратор производительностью 3 т/ч



## 2.5. АКТИВАЦИЯ ЖИДКОЙ СРЕДЫ В КАВИТАТОРАХ

Согласно представленной в главе 1 гипотезе предлагаемая технология ИКЖТ основана на соединении предварительно активированных компонентов. Ранее была рассмотрена активация твердой фазы при размоле в дезинтеграторах. Далее рассматривается активация жидкой фазы – воды в кавитаторах.

Соединение активированных компонентов в физико-химической системе приводит к появлению у системы новых качеств: повышенной реакционной способности и повышенной седиментационной устойчивости.

### 2.5.1. КАВИТАЦИЯ ЖИДКОСТИ В ПОТОКЕ

Физические процессы кавитации в потоке капельной жидкости описаны в известной литературе [156, 158 – 160].

Кавитация (от лат. *cavitas* – пустота) – образование в капельной жидкости полостей, заполненных газом, паром или смесью (так называемых кавитационных пузырьков, или каверн). Такие пузырьки образуются в тех местах потока, где внешнее давление в жидкости становится меньше некоторого критического давления  $P_{кр}$ , примерно равного давлению насыщения при данной температуре.

Кавитация может возникать в результате больших местных скоростей в потоке при обтекании криволинейных поверхностей или вследствие звуковых волн с частотой 15...25 кГц, проходящих в жидкости. В первом случае кавитация носит название гидродинамической, во втором – акустической. Гидродинамическая кавитация развивается за счет мельчайших пузырьков газа или пара, всегда присутствующих в реальной жидкости. Перемещаясь вместе с жидкостью, пузырьки попадают в область с  $P < P_{кр}$ , при этом начинается их неограниченный рост. Попадая затем в область с  $P > P_{кр}$ , пузырек сокращается. Если концентрация газа в пузырьке выше некоторого предельного значения, то сокращение происходит до минимального радиуса, в результате чего пузырек восстанавливается и совершает несколько циклов затухающих колебаний. Если концентрация газа мала, то пузырек схлопывается полностью в первом периоде жизни. Совокупность кавитационных пузырьков образует «кавитационную зону».



Сокращение кавитационного пузырька происходит с большой скоростью и носит характер коллапса. Согласно некоторым современным представлениям стенки пузырька сближаются со скоростью, сопоставимой со скоростью света. Возникающая при этом ударная волна в нанопространстве в течение пикосекунд концентрирует в себе очень большую энергетическую мощность, достаточную для разрыва межмолекулярных связей в жидкости и связей в ассоциациях жидкостных молекул – кластерах. Таким образом, при кавитационных явлениях осуществляется основной термодинамический процесс – трансформация макрофизической формы подвода энергии (механической) в микрофизическую (тепло). Происходит сильный разогрев жидкости. Кроме того, вследствие сложного процесса трансформации имеют место сонолюминесценция и генерация звука.

Прочность на разрыв воды, вычисленная при учете тепловых флуктуаций, равна  $150 \text{ МН/м}^2$ . Реальные жидкости менее прочны. Максимальное напряжение тщательно очищенной воды, достигнутое при растяжении воды при  $10^\circ\text{C}$ , составляет  $28 \text{ МН/м}^2$ . Обычно разрыв возникает при давлениях, лишь немногим меньших давления насыщения. Низкая прочность реальных жидкостей связана с наличием в них так называемых кавитационных зародышей: плохо смачиваемых участков твердого тела, твердых частиц с трещинами, заполненными газом, микроскопических газовых пузырьков, предохраняемых от растворения мономолекулярными органическими оболочками, ионами и тому подобными образованиями.

Кавитация в потоке возникает при определенном для данной точки потока значении безразмерного параметра:

$$\chi = \frac{2(P - P_{\text{н}})}{\rho V_{\infty}^2}, \quad (2.30)$$

где  $P$  – гидростатическое давление набегающего потока;  $P_{\text{н}}$  – давление насыщения при температуре жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $V_{\infty}$  – скорость жидкости в ядре течения. Этот параметр называют «числом кавитации».

Пузырьковая кавитация может развиваться в струйную, особенно в области за плохообтекаемыми телами. Такой вид кавитации носит название «суперкавитация».



### Акустическая кавитация

При излучении в жидкость звуковых волн с амплитудой, превышающей некоторое пороговое значение, во время полупериодов разрежения на кавитационных зародышах возникают кавитационные пузырьки.

Схлопывание пузырьков происходит в полупериоде сжатия. При этом развиваются кратковременные (порядка  $10^{-6}$  с) импульсы давления (до  $10^3$  МН/м<sup>2</sup> и более), способные разрушать даже весьма прочные материалы. Схлопывание пузырьков сопровождается адиабатическим нагревом газа в пузырьках до температуры порядка  $10^4$  °С, чем, по-видимому, и вызывается свечение пузырьков при кавитации (сонолюминесценция) и ионизация газа [161 – 163].

Феноменологическая теория кавитации в настоящее время отсутствует, хотя исследования кавитации как теоретические, так и экспериментальные изложены в работах ряда авторов (А.М. Басин, Г.К. Бетчелор, В.М. Ивченко, В.П. Карликов, В.К. Кедринский, Б.С. Когарко, В.М. Лаврентьев, Г.В. Логвинович, Л.И. Мальцев, Р.И. Нигматулин, Т. Нишияма, Н.Н. Поляков, Н.А. Приходько, Х.А. Рахматулин, Л.И. Седов, С.Г. Телетов, Ф.И. Франкль и др.), а также зарубежных ученых (П. Виллемс, К. Вайнер, П. Кифер, Б. Коглик, Г. Мерло, Д. Полонский, Си-Дин-Ю, Е. Руд, Д. Стауффер, А. Трейбер, П. Шеррат, К. Ямамото) [164].

Сложность создания теории заключается в том, что кавитационная зона представляет собой неравновесную термодинамическую систему, понятие «континуум» к которой неприменимо. В такой системе очень сложно связать микрофизические характеристики ячейки этой системы – газодинамического пузырька и макрофизические (феноменологические) характеристики всей системы. Однако некоторые общие свойства системы являются установленными. Так, В.С. Рудаков показал, что изменение гидродинамических характеристик тел и лопастей механизмов, работающих в таких средах, происходит по законам, аналогичным законам для сжимаемой жидкости.

Скорость звука в пенных и двухфазных пузырьковых дисперсных средах в десятки раз ниже, чем в газовых средах. В.А. Кулагин [164]





приводит формулу Маллока для определения скорости звука в высокодисперсной смеси жидкости с парогазовыми пузырьками:

$$\frac{1}{c^2} = \left(1 - \alpha \frac{\rho_\ell}{\rho}\right) \left(\frac{\rho}{\rho_\ell}\right)^2 \frac{1}{c_\ell^2} + \alpha \frac{\rho_\ell}{\rho} \left(\frac{\rho}{\rho_g}\right)^2 \frac{1}{c_g^2}, \quad (2.31)$$

где  $\rho = (1 - \alpha)\rho_\ell + \alpha\rho_g$  – плотность смеси;  $\alpha = N \frac{3}{4} \pi R^3$  – объемная концентрация газовой фракции;  $\rho_\ell$  – плотность жидкости;  $\rho_g$  – плотность газа;  $c_\ell$  – скорость звука в жидкости;  $c_g$  – скорость звука в газе.

В литературе [50] приводятся данные по измерению скорости звука в пенных средах, которая имеет значение на уровне 20 м/с. Математические модели различных типов, описывающие движение газопаровых пузырьков в кавитационном поле, позволяют утверждать, что в межфазовой среде имеют место течения микроструек со скоростью до 100 м/с при общей скорости движения потока 6...10 м/с.

В исследованиях В.А. Кулагина сформулирована физическая модель кавитационного гидротермодинамического воздействия, которая может быть представлена двумя основными механизмами: распространением ударных волн вблизи схлопывающихся кавитационных микропузырьков и ударным действием кумулятивных микроструек при их несимметричном коллапсе. При этом реализуются поля высоких температур (до 2000 °С) и давлений (до 10 000 атм). Скорость кумулятивных струек может достигать 500 м/с. Явление сопровождается интенсивным турбулентным микроперемешиванием и механотермолизом воды с образованием  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O_2$  и свободных водородных связей. Таким образом, локальная область вблизи схлопывающегося кавитационного микропузырька является уникальным реактором для проведения различных реакций и технологических процессов, осуществляемых при нормальных внешних физических условиях. В табл. 2.5 обобщены схемы кавитационного воздействия на обрабатываемые среды [164].

В результате исследований изменения свойств воды под действием кавитации установлено, что физические свойства существенно изменяются и сохраняются в течение достаточно длительного времени (до



7...10 суток), что позволяет использовать модифицированную воду в различных технологических процессах.

Было выявлено быстрое кислородонасыщение обрабатываемой воды в воздушной среде, что объясняется наличием кроме диффузионного (за счет высокой степени сжатия парагазового содержимого кавитационного микропузырька) еще и кинетического механизма насыщения воды кислородом, приводящего к ощутимой неравновесности его растворения.

Таблица 2.5

**Схемы силового взаимодействия ударных волн и полидисперсной фазы жидкости**

| №<br>п/п | Схема | Описание   |
|----------|-------|--|
| 1        |       | Взаимодействие одиночной частицы дисперсной фазы с фронтом ударной волны   |
| 2        |       | Взаимодействие частицы с кумулятивной струйкой при несимметричном коллапсе пузырька (при соответствующем размере частицы)  |
| 3        |       | Кроме гидродинамического проявляется и трибомеханическое разрушение частиц вследствие сил трения, качения и сдвиговых деформаций, возникающих при таком контакте |



Окончание табл. 2.5

| №<br>п/п | Схема   | Описание  |
|----------|---|---|
| 4        |   | Взаимодействие одиночной частицы с системой ударных волн при схлопывании групп ударных пузырьков    |
| 5        |   | Воздействие ударных волн при схлопывании групп пузырьков на скопление частиц дисперсной фазы        |
| 6        |   | Одновременное воздействие ударных волн и кумулятивных ультразвуков                                  |
| 7        | Для воды<br>$\text{H}_2\text{O}' \rightarrow \text{H} + \text{OH}^*$ $\text{OH}' \rightarrow \text{OH} + \hbar\nu$ $\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$ $\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{OH} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ | Деструкция несущей фазы в результате кавитационного воздействия и вызванных им механических реакций |



Возбужденная молекула воды наряду с излучением и диссипацией избыточной энергии в тепло может диссоциировать в соответствии с уравнениями (поз. 7 табл. 2.5). Увеличение концентрации  $O_2$  идет за счет гидродинамического кавитационного термоллиза воды на  $H\cdot$  и  $\cdot OH$  и протекания реакций (поз. 7 табл. 2.5).

Изменение pH воды в результате кавитационной обработки происходит за счет образования различных химических соединений, выход которых зависит от режима обработки, наличия в воде примесей и газосодержания. Известно об увеличении щелочности среды в результате обработки ее в ультразвуковом поле средних частот (22 кГц). Относительное изменение кислородосодержания и pH воды при воздействии гидродинамической кавитации в зависимости от длительности обработки показано на рис. 2.9. График рис. 2.9 хорошо коррелируется с результатами, полученными в работе [164].

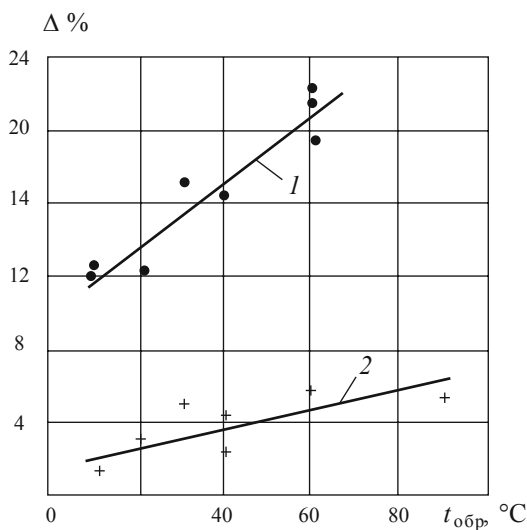


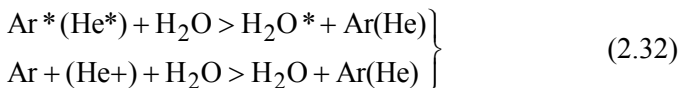
Рис. 2.9. Зависимость  $\Delta_0 - f(t_{обр})$  в атмосфере воздуха ( $C_0 = 100 \%$ ):

1 – бидистиллят;  $pH_0 = 5,4$ ; 2 – неотстоявшаяся водопроводная вода,  $pH_0 = 7,0$

Таким образом, под действием кавитации в водном растворе, содержащем инертные и активные газы, возможно протекание разнообраз-



разных химических реакций. Кавитационное инициирование их сводится к ионизации и возбуждению молекул воды. Каждый из этих процессов происходит за время  $t \sim 10^{-14}$  с. В связи с тем, что продолжительность конечной стадии коллапса пузырька  $t \sim 10^{-9} \dots 10^{-8}$  с, становятся возможными процессы передачи энергии и перезарядки с участием молекул инертных газов, идущих в газовой фазе по уравнениям [164]:



Наряду с указанными в кавитационной полости протекают реакции трансформирования радикалов с участием химически активных газов и рекомбинации радикалов за время  $t \sim 10^{-7} \dots 10^{-6}$  с. В результате этих процессов после схлопывания кавитационного пузырька в раствор переходят продукты радикального разложения молекул  $\text{H}_2\text{O}$  и рекомбинации радикалов, обнаруженные с помощью метода спиновых ловушек, что приводит к накоплению в воде молекулярного  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  и других соединений. Высокая скорость протекания реакций разрушений интенсифицирует процесс кавитационной эрозии, что существенно при эксплуатации различного гидро- и энергооборудования.

Исследования обработки ВУС методами кавитации [164] выявили интересные с технологической точки зрения особенности: изменение характера распределения частиц исходной дисперсной фазы в зависимости от эффективности конверсии.

Под эффективностью конверсии угля понимается отношение содержания фракции угля (0...100 мкм) к общей массе всех фракций угля выборки. Эти результаты представлены на рис. 2.9, на котором видно, что повышение эффективности конверсии угля не только увеличивает значение удельной поверхности частиц за счет уменьшения их размеров, но и значительно снижает гетерогенность распределения частиц, т. е. приближает ВУС по этому параметру к моносубстанту, не отличающемуся от фракционного гетерогенностью химического состава.

В процессе гидродинамической обработки можно выделить три периода, отличающихся характером изменения физико-химических



параметров ВУС и свойствами дисперсной фазы – угля в ВУС (рис. 2.11 и 2.12):

1) кавитационное разрушение, гомогенизация и первичное диспергирование дисперсной фазы, максимальная скорость гидратации и тепловыделения, возрастание буферных свойств и электропроводности, незначительное уменьшение объема дисперсной фазы (продолжительность 5...10 мин);

2) основная фаза диспергирования: активация поверхностных физико-химических свойств дисперсной фазы, увеличение выхода микродисперсной фазы и соответственно увеличение объема осадка ВУС, возрастание буферности и электропроводности, седиментационной устойчивости ВУС (продолжительность 20...30 мин);

3) уменьшение агрегативной и седиментационной устойчивости ВУС при достижении критического значения степени диспергирования в концентрации микродисперсной фазы (продолжительность 10...20 мин).

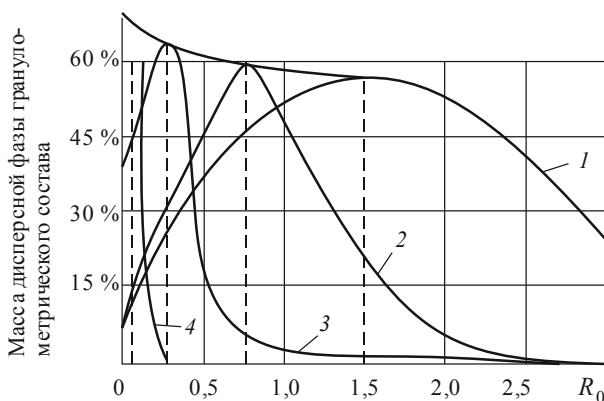


Рис. 2.10. Характер распределения частиц исходной дисперсной фазы ВУС  $R$  при различной степени глубины помола (по показателю эффективности конверсии):

1 – 15 %; 2 – 30 %; 3 – 45 %; 4 – 90 %

Следует отметить более высокую активность и скорость диспергирования при гидромеханической активации фракционированного угля моносубстата по сравнению с нефракционированным гетерофазным (по химическому составу) субстратом (рис. 2.12).

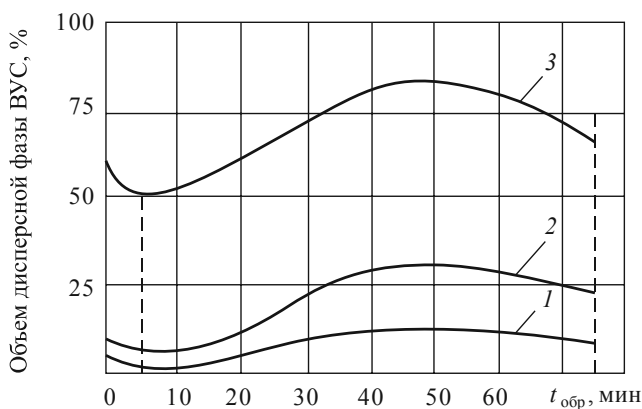


Рис. 2.11. Изменение объема ДФ в процессе кавитационной обработки ВУС с различной исходной концентрацией:

1 – 10 %; 2 – 20 %; 3 – 40 %

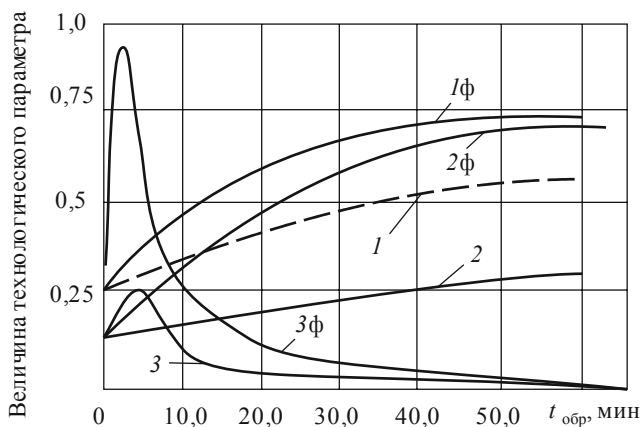


Рис. 2.12. Изменение технологических характеристик ВУС нефракционированного и фракционированного (ф) угля в процессе кавитационной обработки:

1, 1ф – буферность ВУС; 2, 2ф – электропроводность ВУС, В/см<sup>2</sup> · 2,0; 3, 3ф – скорость гидратации ВУС, °С/с · 0,85 · 10<sup>-2</sup>



При обработке ВУС различной исходной концентрации наблюдается снижение скорости седиментации осадка при повышении концентрации исходной дисперсной фазы – угля в ВУС (рис. 2.13).

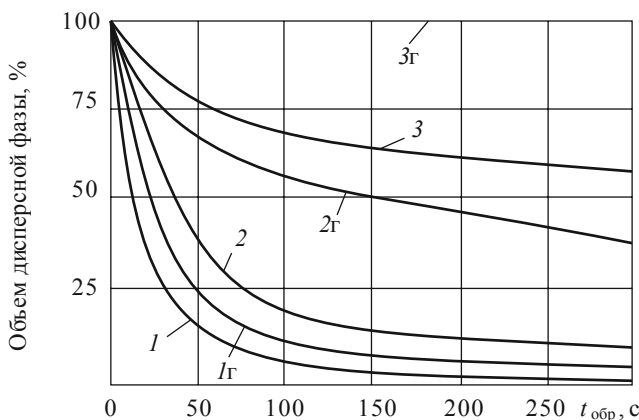


Рис. 2.13. Кинетика седиментации дисперсной фазы ВУС без предварительной обработки (контроль) и после кавитационной обработки (Г):

1, 1Г – 10 %; 2, 2Г – 20 %; 3, 3Г – 40 %

С увеличением объема дисперсной фазы повышается электропроводность и буферность ВУС (комплексный показатель  $\frac{\Delta V}{V \Delta(\text{pH})}$ ,

$\frac{1}{\lg \text{pH}}$ , где  $\Delta V$  – объем титрирующего реагента (10 %-й раствор NaOH);

$V$  – объем опытного образца,  $\Delta(\text{pH})$  – отклонение величины pH от исходной при титровании). Поверхностное натяжение изменяется менее существенно (максимум при концентрации 20...30 %). В этом же интервале концентрации максимально изменяется объем дисперсной фазы после гидродинамической обработки. Ухудшаются фильтрационные и водоотталкивающие свойства ВУС, что видно из зависимостей, представленных на рис. 2.14 и 2.15.



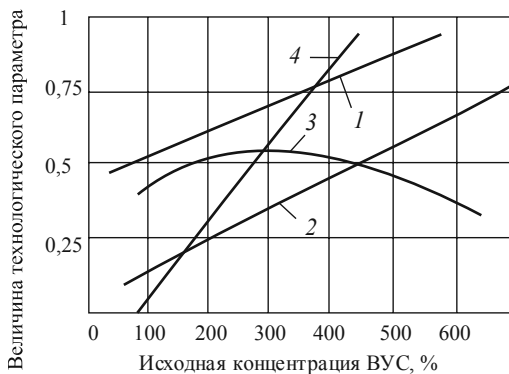


Рис. 2.14. Влияние исходной концентрации дисперсной фазы ВУС на технологические характеристики ( $t_{\text{обр}} = 45$  мин):

1 – электропроводность, В/см<sup>2</sup>; 2 – буферность, 1/см<sup>2</sup> рН; 3 – поверхностное натяжение, 1/см<sup>2</sup> · 1,7;  
4 – объем дисперсной фазы, % · 100

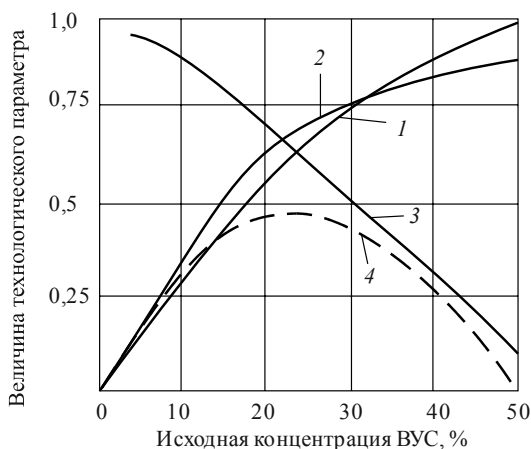


Рис. 2.15. Влияние исходной концентрации ДФ ВУС на технологические характеристики при кавитационной обработке ( $t_{\text{обр}} = 45$  мин):

1 – удельный объем ДФ, мл/г · 2,0; 2 – время фильтрации ВУС, с · 200,0; 3 – объем ДФ, % · 100;  
4 – изменение объема ДФ, % · 100



Эффективность ВУС возрастает при использовании маслосодержащей или загрязненной другими нефтепродуктами воды.

### 2.5.2. ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КАВИТАТОРА И ВНУТРЕННИЙ ПРОЦЕСС КАВИТАЦИИ

Безразмерный кавитационный параметр, или кавитационный коэффициент (2.30)

$$\chi = \frac{2(P - P_H)}{\rho V_\infty^2}$$

не совсем удобен для контроля за процессом кавитации, который происходит внутри кавитатора. Поэтому Тома [166] предложил в качестве кавитационного коэффициента величину, определяемую только внешними параметрами кавитатора:

$$\sigma = \frac{H_a - H_S - H_\Pi - \Delta h_{W_{\text{вх}}}}{H}, \quad (2.33)$$

где  $H_a$  – абсолютное давление, м  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $H_S$  – геометрическая высота всасывания, м;  $H_\Pi$  – давление насыщенных паров перекачиваемой жидкости, м  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $\Delta h_{W_{\text{вх}}}$  – гидравлические потери на входе, м  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $H$  – полный напор на кавитаторе, м  $\text{H}_2\text{O}$ .

Зависимость между  $\chi$  и  $\sigma$  в соответствии с несколько упрощенной формулой [167]:

$$\chi = \frac{2\psi_2\sigma\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2}{\rho(1+\varphi_1^2)}, \quad (2.34)$$

где  $\psi = \frac{H_d}{n^2}$  – безразмерный коэффициент напора;  $\varphi = \frac{Q}{F\rho w}$  – безразмерный коэффициент расхода;  $F$  – площадь потока на всасе,  $\text{м}^2$ ;



$\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $w$  – скорость потока во входном патрубке, м/с.

В 1935 г. С.С. Руднев предложил исключить величину напора из коэффициента, характеризующего кавитационные свойства насоса, и получил на основе обобщения опытных данных коэффициент

$$C = \frac{5,62n\sqrt{Q}}{\Delta h_{g\max}^{3/4}}, \quad (2.35)$$

где  $\Delta h_{g\max}$  – максимально допустимое с точки зрения кавитации значение динамического падения давления на входе в рабочее колесо кавитатора.

Взаимосвязь между коэффициентом кавитации  $\sigma$  и коэффициентом кавитации  $C$ :

$$\sigma = \frac{10}{H} \left( \frac{n\sqrt{Q}}{C} \right)^{4/3}. \quad (2.36)$$

Н.П. Розанов предложил коэффициент кавитации, в котором учитывается допустимый вакуум в зоне возможной кавитации с учетом пульсаций давления:

$$h_{\max} = \frac{P_a}{\rho g} - \frac{P_{\text{п}}}{\rho g} - \Delta_1 - \Delta_2, \quad (2.37)$$

где  $\Delta_1$  – амплитуда пульсации вакуума, вызванная турбулентными микропульсациями;  $\Delta_2$  – амплитуда пульсаций, вызванная набегающими волнами.

В гидродинамических кавитаторах пульсации давления, создающие кавитацию, вызываются вращением решеток при перекрытии движения струек жидкости.

В кавитаторах такого типа устанавливаются две рабочие решетки: одна неподвижна, вторая вращается относительно неподвижной либо обе вращаются в разные стороны. В решетках имеются окна, расположенные друг против друга. Когда при вращении окна совпадают, через



них проходит струйка жидкости, при последующем перекрытии окон происходит разрыв струйки. Такие периодические перекрытия струйки создают пульсации давления в жидкости, что и вызывает кавитацию. Минимальное давление в жидкости наблюдается в момент отрыва струйки от решетки. Амплитуда такой пульсации равна

$$\Delta_1 = \frac{V}{\tau}, \quad (2.38)$$

где  $V$  – скорость струйки в окнах решетки;  $\tau$  – время перекрытия окон.

Время  $\tau$  рассчитывается из условий вращения решеток, размеров рабочего колеса и геометрических размеров и расположения окон.

Величина  $\Delta_2$  в кавитаторах может не учитываться.

Тогда коэффициент по Розанову

$$k_{кр} = \frac{P_{\infty} - P_n - \rho g \Delta_1}{\rho g q_{\infty}}, \quad (2.39)$$

где  $P_{\infty}$  – давление струйки в окнах;  $P_n$  – давление насыщения при температуре жидкости;  $q_{\infty}$  – динамический напор в струйке, подходящей к окну.

Кавитатор гидродинамического типа может рассматриваться как насос, работающий в режиме кавитации. У него низкий КПД, но внешние характеристики подобны аналогичным характеристикам насоса. Так, при моделировании кавитаторов на основе эталона вполне можно использовать такую характеристику, как коэффициент быстроходности

$$n_S = 3,65 \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}, \quad (2.40)$$

где  $Q$  – производительность насоса, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – напор, м вод. ст.

Коэффициент быстроходности, или удельное число оборотов, представляет собой число оборотов эталонного колеса, геометрически подобного рассматриваемому и потребляющему мощность 1 л.с. (0,735 кВт) при напоре 1 м вод. ст. и производительности 0,75 м<sup>3</sup>/с. Проектируемый в рамках подобия кавитатор будет иметь другое число



оборотов, другой напор, другую производительность, но коэффициент быстроходности у него будет тот же, что и у эталона.

Отличие режима работы кавитатора от режимов работы насоса при общности основных процессов и характеристик может быть проиллюстрировано при анализе уравнения энергии для потока жидкости, проходящей через машину. Для общего случая:

$$\frac{P_1}{\rho} = \frac{P_a}{\rho} + \frac{P_{изб}}{\rho} - H_S - \frac{V_1^2}{2} - h_{W_{0-1}}, \quad (2.41)$$

где  $P_1$  – давление на входе в рабочее колесо;  $P_a$  – атмосферное давление;  $P_{изб}$  – избыточное давление насоса;  $H_S$  – геодезическая высота всасывания;  $V_1$  – скорость жидкости на входе в рабочее колесо;  $h_{W_{0-1}}$  – падение давления во входном патрубке.

Для нормальной работы насоса необходимо, чтобы

$$P_{1\min} > P_{кр}, \quad (2.42)$$

где под критическим давлением понимают  $P_{н}$  насыщения для жидкости при данной температуре.

Для кавитатора

$$P_1 < P_{н}. \quad (2.43)$$

Для нормальной работы необходимо, чтобы удельная энергия потока на входе  $E_1$  была достаточна для создания скоростей и ускорений в потоке. Поэтому важна не абсолютная величина  $E_1$ , а ее превышение над энергией, соответствующей давлению насыщенного пара жидкости. Эта разница  $H_{SV}$  носит название «кавитационный запас» (рис. 2.15)

$$H_{SV} = E_1 - \frac{P_{н}}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} - \frac{V_1^2}{2} - \frac{P_{н}}{\rho}. \quad (2.44)$$

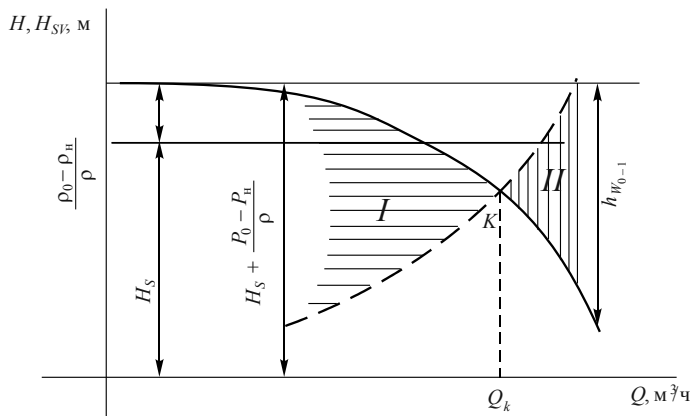


Рис. 2.16. Изменение действительной и требуемой величин кавитационного запаса в зависимости от подачи насоса-кавитатора:

*I* – область работы насоса; *II* – область работы кавитатора

Для кавитатора (или при работе насоса в кавитационном режиме) кавитационный запас отрицателен:

$$H_{SV} < 0,$$

что наглядно следует из рис. 2.16.

В диссертации В.А. Калугина [164] обобщены результаты многолетних исследований в области кавитационных процессов в многофазных системах. Эти исследования выполнялись в Красноярском государственном университете (теперь ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»). В работах В.А. Калугина с соавторами рассмотрены вопросы образования и развития пузырьковой кавитации в жидкости, квазиравновесные модели кавитации, реакторы с использованием суперкавитационных процессов, кинетика кавитационного воздействия и кавитационные технологии. В книге [168] подробно рассмотрена физическая сущность кавитационных процессов и явлений, а в монографии [169] изучены математические модели и получены решения сложных задач механики жидкости и газа в двухфазных распределенных системах при кавитационных процессах в существенно неравновесных термодинамических системах.



Гидродинамические процессы диспергирования гетерогенных систем исследованы в монографии [170]. Гидромеханическое диспергирование наиболее эффективно осуществляется в аппаратах с периодическим прерыванием потока обрабатываемой среды, которые бывают двух видов: статические аппараты, прерывание потока в которых осуществляется за счет конструкции, и динамические (роторные) аппараты, где прерывание потока происходит при вращении ротора, размещенного коаксиально статору; в рабочих поверхностях ротора и статора выполнены каналы для протекания обрабатываемой среды.

Разработанные до настоящего времени методы расчета параметров (геометрических, гидромеханических, гидравлических и кавитационных) роторных гидромеханических диспергаторов основываются либо на теории гидравлического удара, либо на применении нестационарного уравнения Бернулли без учета в нем нестационарности и центробежных сил инерции. В настоящей монографии на базе единого гидромеханического нестационарного подхода и результатов комплексных исследований гидродинамики потоков гетерогенных сред в гидромеханических диспергаторах роторного типа в широком диапазоне свойств обрабатываемых сред представлены разработанные методы расчета размерных параметров каналов ротора и статора, параметров полости ротора и рабочей камеры. Приведены конкретные примеры расчетов роторных гидромеханических диспергаторов различных конструкций и даны конкретные практические рекомендации по их использованию и технологическому применению.

### **2.5.3. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ КАВИТАТОРЫ**

Предложения промышленных гидродинамических кавитаторов широко представлены в реестре изобретений. Ниже приведены некоторые конструкции кавитаторов для промышленного использования, охватывающие практически все типы механических кавитаторов.

#### **Кавитатор гидродинамического типа [171]**

Кавитатор предназначен для получения тепловой энергии. Кавитатор содержит вход и выход, по меньшей мере, одного рабочего канала, сообщенные с источником рабочей жидкости, а сам указанный рабочий канал выполнен с переменным по течению потока жидкости сечением и имеет в наименьшем своем сечении форму щели, при этом на



его выходе установлена камера торможения выходящего из щели потока, а геометрическая конфигурация рабочего щелевого канала и камеры торможения обеспечивает взаимные пересечения в ней линий потока, поступающего в камеру торможения жидкости. Технический результат – повышение интенсивности кавитационных процессов.

### **Кавитационно-вихревой теплогенератор [172]**

Этот теплогенератор содержит корпус, имеющий патрубки для подвода нагреваемой жидкости и отвода нагретой жидкости, расположенный внутри него ротор, нагнетательный насос, привод ротора, отличающийся тем, что ротор выполнен в виде двух соосных дисков, установленных с зазором относительно друг друга и перфорированных сквозными отверстиями, при этом диски смонтированы на независимых валах, имеющих самостоятельные независимые приводы и вращающихся навстречу друг другу.

### **Кавитатор Мошонкова [173]**

Изобретение относится к устройствам для измельчения и может быть использовано в химической, металлургической и других отраслях промышленности. Кавитатор Мошонкова содержит корпус, в котором расположено дробильное устройство, выполненное в виде подвижных тел с сопрягающимися конусными образующими. Они покрыты кавитационно стойким упругоэластичным материалом и приводятся во встречное возвратно-поступательное движение посредством тяг с шатунами, коленчатого вала с маховиками. Отражательные козырьки предохраняют обслуживающий персонал от струи и выброса абразивной пульпы.

### **Гидродинамический кавитационный аппарат [174]**

Аппарат предназначен для обработки потоков жидкости с целью повышения их энергонасыщенности. Цель изобретения – стабилизация характеристик кавитации, снижение эрозии частей аппарата, получение энергонасыщенных потоков жидкости, в том числе и воды. Аппарат выполнен в виде трубы, содержащей на входном отверстии торцевую крышку – ускоритель потока, цилиндрическую камеру – разделитель потока, приемник потока, кавитационную вставку-сопло, помещенную в конфузорную камеру, выполненную в виде кольцевого канала, и камеру-глушитель. Поток жидкости, подаваемый через каналы в торцевой крышке цилиндрической камере, за счет вращения разделя-



ется на периферийный нагретый и осевой, более холодный. Периферийный поток через приемник поступает во внутреннюю часть кавитационной вставки-сопла, осевой поток через каналы в торцевой крышке поступает в камеру-рубашку, а из нее через радиальные каналы – в конфузорную камеру.

При смешивании двух потоков на выходе из сопла возникает кавитация, в результате чего накопленная при движении кинетическая энергия переходит в тепловую, жидкость нагревается. Техническим результатом, достигаемым в аппарате предложенной конструкции, является стабилизация характеристик кавитации, повышение интенсивности процесса за счет увеличения количества точек генерирования кавитации, получение энергонасыщенного потока жидкости, упрощение управления аппаратом.

### Устройство для воздействия на поток текучей среды [175]

Изобретение предназначено для возбуждения регулируемой гидродинамической кавитации с целью нагрева текучей среды и/или диспергирования в ней твердых или жидких материалов. Оно имеет осесимметричный проточный канал для прокачивания основного потока текучей среды и отверстие в стенке этого канала для подачи в основной поток возмущающей струи и возбуждения гидродинамической кавитации. Для уменьшения гидравлических потерь и шумности, повышения надежности и КПД указанное отверстие открыто непосредственно в полость канала, а его геометрическая ось пересекается с геометрической осью канала под углом, выбранным в интервале от  $-60$  до  $+45$ . При этом предпочтительно иметь несколько таких отверстий для подачи в основной поток возмущающих струй той же самой или иной по химическому составу текучей среды (рис. 2.17)

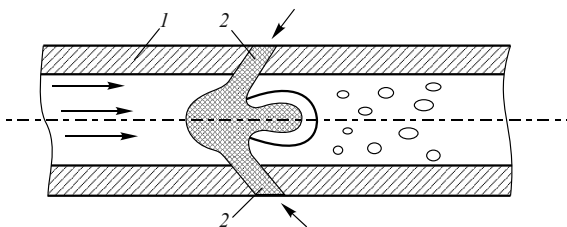


Рис. 2.17. Основной канал (1); возмущающая струя (2)



### Способ кавитации потока жидкости и устройство для ее осуществления [176]

Способ и устройство могут быть использованы для воздействия на нефтяные пласты с целью повышения потоков или приемистости продуктивных объектов в скважине. Устройством воздействуют на забой скважины при бурении, чтобы интенсифицировать процесс разрушения проходимых горных пород и уничтожать микробиологические объекты, очищать поверхности от наслоений; кроме того, его используют для диспергирования твердых частиц в жидкости и высокомолекулярных соединений; для эмульгирования нерастворимых веществ, эффективного внутреннего массообмена. Способ кавитации является гидродинамическим. Поток в данном сечении канала нагнетательного трубопровода разгоняют до скорости, при которой  $Re > Re_{кр}$ , где  $Re$  – критическое число Рейнольдса, а затем прерывают поток с периодом, меньшим полуфазы гидроудара. За счет этого получают разрывы потока. Устройство для кавитации потока содержит в канале нагнетательного трубопровода (рис. 2.18) кавитатор 2, который выполнен в виде рабочего тела. Рабочее тело расположено в корпусе 1 с возможностью перемещения его в радиальном направлении трубопровода и ограничением перемещения в осевом направлении трубопровода. Площадь максимального поперечного сечения рабочего тела в плоскости, перпендикулярной оси трубопровода, составляет более 0,8 проходного сечения трубопровода, но не равна ему. Для облегчения разрыва потока при высоких гидростатических давлениях в прокачиваемую жидкость вводят зародыши кавитации в виде пузырьков газа или дисперсии твердых частиц, или эмульсию нерастворимой жидкости. Технический результат – получение кавитации при гидростатических давлениях.

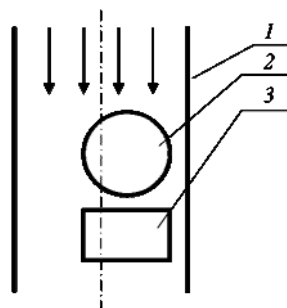


Рис. 2.18. Трубопровод (1); кавитатор (2); ограничитель (3)

### Диспергатор [177]

Диспергатор содержит корпус с входным штуцером и выходным коллектором, смонтированными в корпус, статор с радиальными торцевыми выемками и лопастное колесо с обечайкой, имеющей радиаль-

ные прорезы. На статоре и обечайке выполнены конические пояски, образующие многогранную кольцевую размольную камеру. В камере размещены мелющие элементы. При движении обрабатываемой среды через прорезы диспергатора мелющие элементы совершают движения сложного характера, особенности и интенсивность которых зависят от физико-механических свойств обрабатываемой среды, конструктивных параметров, режимов работы. При этом существенно увеличиваются кавитационные явления, турбулентность, вихреобразования и пульсационные нагрузки, что интенсифицирует процесс диспергирования.

### Кавитатор для тепловыделения в жидкости [178]

Изобретение может быть использовано в теплоэнергетике в аппаратах нагрева жидкостей различного назначения. Кавитатор для тепловыделения в жидкости содержит размещенные внутри цилиндрического

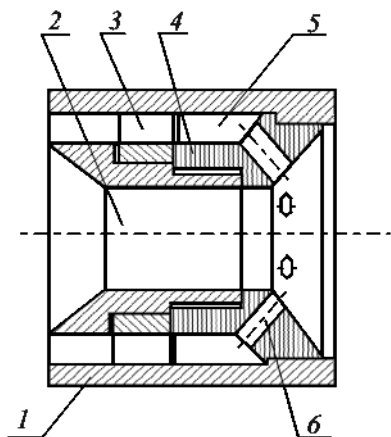


Рис. 2.19. Корпус (1); трубка Вентури (2); шнек (3); вставка (4); продольные пазы (5); отверстия (6)

го корпуса 1 соосно с ним трубку Вентури 2 и установленную на ней вставку 4. Перед вставкой 4 со стороны набегающего потока на трубке Вентури 2 установлен с возможностью вращения относительно ее шнек 3. Вставка 4 со стороны выхода потока выступает за пределы трубки Вентури. На наружной поверхности вставки 4 выполнены продольные пазы 5, открытые со стороны шнека 3, а с противоположной стороны сообщаемые посредством отверстий 6 с выходной поверхностью вставки 4. Использование изобретения обеспечивает увеличение коэффициента преобразования энергии движущейся жидкости в тепловую (рис. 2.19).

### Кавитатор гидродинамического типа [179]

Кавитатор относится к устройствам для кавитационной обработки жидкостей и их смесей, газожидкостных эмульсий, твердых веществ совместно с жидкостью, а также для получения тепла.



Рассмотрим несколько вариантов выполнения предложенного кавитатора гидродинамического типа.

На рис. 2.20 приведен вариант кавитатора с рабочим каналом 1, сообщаемым с источником жидкости, например насосом 2.

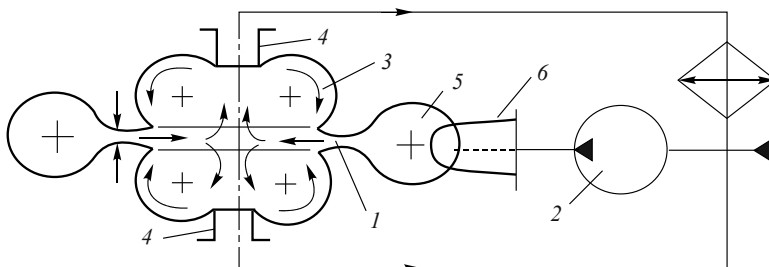


Рис. 2.20. Кавитатор гидродинамического типа

Рабочий канал 1 выполнен с переменным по течению жидкости сечением, наименьшее из которых имеет форму кольцевой щели высотой  $\delta$ . Канал выполнен кольцевым осесимметричным, направляющим поток в плоскости, перпендикулярной к оси, в камеру торможения 3. При этом геометрическая конфигурация рабочего канала 1 и камеры 3 обеспечивает взаимное пересечение в камере линий токов рабочей жидкости, поступающей в камеру торможения, выходы 4 из которой сообщаются с входом насоса 2. Конфигурация камеры 3 обеспечивает создание по обеим сторонам вытекающего из канала 1 друг другу навстречу плоского щелевого потока жидкости торообразных вихревых жгутов, интенсифицирующих циркуляционное натекание сплошной жидкости с двух сторон на щелевой поток, что приводит к его обжатию и ускорению коллапса кавитационных каверн в этом потоке. С другой стороны, указанные вихревые жгуты облегчают выход жидкости из камеры 3 в выходы 4, способствуя повышению давления в них, что необходимо для бескавитационной работы источника питания – насоса 2.

Выход насоса 2 сообщается с входным круговым коллектором 5 рабочего канала 1. Коллектор 5 может быть кольцевым или в виде спиральной улитки. При этом в канал 1 поток может поступать из коллектора 5 или радиально, или дополнительно иметь тангенциальную

составляющую, что определяется расположением канала 6, связывающего насос 2 и коллектор 5.

В варианте выполнения по рис. 2.21 кольцевая щель 1 направлена к центральной оси под углом  $\alpha < 180^\circ$  и поверхность щелевого потока образует конус, направленный вершиной в сторону выходного кольцевого коллектора 7, камеры торможения 3, протяженной по оси для обеспечения полного коллапса кавитационных каверн в потоке жидкости. Входной канал 6 в коллектор 5 выполнен тангенциальным для обеспечения закрутки как щелевого потока, так и потока в камере торможения. По оси камеры торможения ее торцы 8 и 9 сообщены шунтирующим каналом 10 с регулируемым дросселем 11. Коллектор 7 сообщается с входом источника питания, а коллектор 5 – с его выходом.

В варианте выполнения по рис. 2.22 кольцевая щель направлена к центральной оси под углом  $\alpha < 180^\circ$  к торцевой полости 12 камеры торможения 3, а поток направлен в сторону, противоположную выходному коллектору 7 камеры 3. Полость 12 имеет конфигурацию, обеспечивающую поворот вытекающего из щели 1 потока и его прохождение через этот поток к выходному коллектору, что вызывает высокочастотные пульсации давления в камере торможения 3 и, следовательно, существенное повышение интенсивности кавитационных процессов. Этот кавитатор может быть выполнен также с шунтирующим торцы камеры 3 каналом, аналогичным каналу 10 по рис. 2.21.

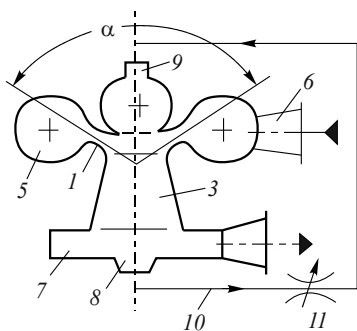


Рис. 2.21. Кавитатор гидродинамического типа (вариант 2)

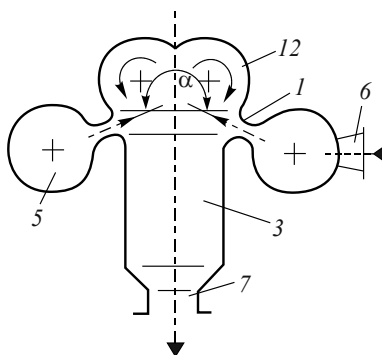


Рис. 2.22. Кавитатор гидродинамического типа (вариант 3)



### Диспергатор [177]

Этот аппарат производится на заводах химического машиностроения и представляет собой роторный аппарат-диспергатор, предназначенный для тонкого измельчения и гомогенизации твердых тел в жидкости. Диспергатор может применяться в лакокрасочной, пищевой, строительной и других отраслях промышленности для получения качественных тонкодисперсных паст, эмульсий, растворов, кремов и различных суспензий, например известкового молока.

На рис. 2.23 показан диспергатор с шаровыми мелющими элементами, продольный разрез: на рис. 2.24 – разрез А-А на рис. 2.23; на рис. 2.25 – разрез Б-Б на рис. 2.23; на рис. 2.26 – узел крепления статора в корпусе; на рис. 2.27 – вариант снабжения диспергатора пустотелыми роликовыми мелющими элементами.

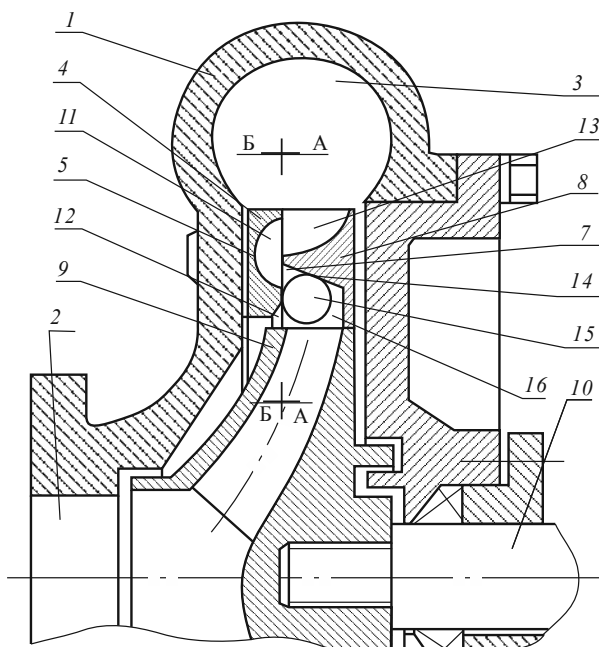


Рис. 2.23. Продольный разрез диспергатора с шаровыми мелющими элементами

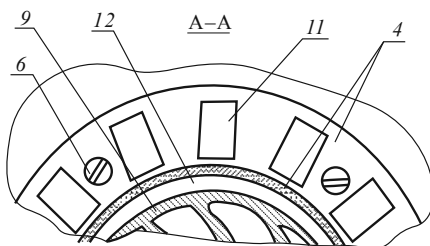


Рис. 2.24. Разрез А-А на рис. 2.23

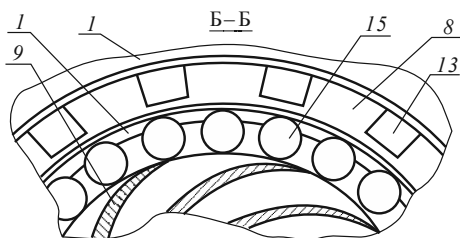


Рис. 2.25. Разрез Б-Б на рис. 2.23

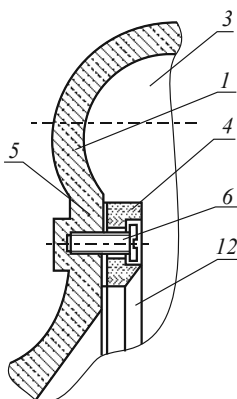


Рис. 2.26. Узел крепления статора в корпусе

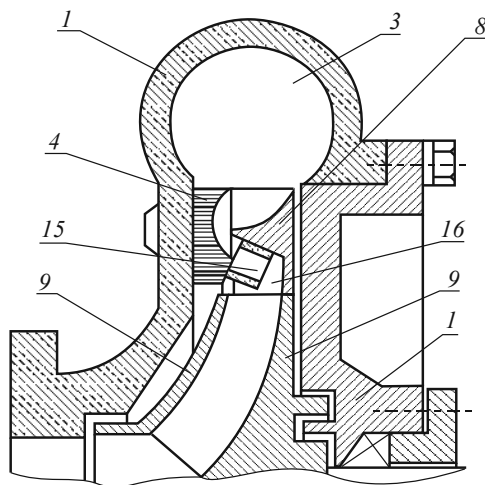


Рис. 2.27. Вариант снабжения диспергатора пустотелыми роликовыми мелющими элементами

Диспергатор состоит из корпуса 1, снабженного входным коллектором 3 и статором 4, смонтированным на упругой, например резиновой, подкладке 5 с помощью крепежных винтов 6, и может перемещаться на 0,1...1,0 мм относительно их в осевом и радиальном направлениях с осевым зазором 7, равным 0,1...1,0 мм от торца обечайки 8. Обечайка 8 смонтирована жестко на лопаточном колесе 9 приводного вала 10. Статор 4 изготавливается из стали или твердой резины и снабжен радиальными выемками 11 и коническим пояском 12. Обечайка 8 снабжена радиальными пазами 13 и коническим пояском 14. Между коническими поясками 12 и 14 свободно размещены мелющие элементы 15, выполненные, например, из стали, керамики, пластмассы, резины и т. п.

Диспергатор работает следующим образом. Суспензия, подлежащая диспергированию, поступает через входной штуцер 2, нагнетается лопаточным колесом 9 при вращении приводного вала 10 в размольную камеру 16 и из нее в радиальные выемки 11 статора 4. При совпадении радиальных выемок 11 статора 4 с вращающимися радиальными пазами 13 обечайки 8 суспензия под давлением выбрасывается из них в выходной коллектор 3 в виде кавитационной струи и далее в выход-





ной штуцер к потребителю. При перекрытии радиальных выемок 11 статора 4 межпазовыми стенками обечайки 8 истечение струи суспензии из радиальных пазов 13 прерывается, давление в радиальных выемках 11 и в размольной камере 16 повышается, статор 4 отходит от торца обечайки 8, образуя зазор 7 в несколько больших размерах, чем монтажный, за счет упругой деформации на величину подкладки 5. При этом шаровые мелющие элементы 15 перемещаются на больший радиус по коническим поясам 12 и 14, осуществляя механический размол мелких частиц суспензии за счет ударов и раздавливания. В зазоре 7 происходит в основном механическое истирание предварительно измельченных в размольной камере 16 твердых частичек суспензии. При дальнейшем вращении лопаточного колеса 9 радиальные выемки 11 и пазы 13 вновь совпадают и через них начинается истечение суспензии в выходной коллектор 3. При этом давление в размольной камере 16 и радиальных выемках 11 и пазах 13 падает. Упругая подкладка 5 возвращает статор 4 в исходное положение. При этом твердые частицы суспензии, находящиеся в зазоре 7, подвергаются помимо истирания удару и раздавливанию за счет инерции движения статора 4 к торцу обечайки 8. Шаровые мелющие элементы 15 перемещаются по коническим поясам 12 и 14 на меньший радиус. Поскольку конический пояс 14 вращается, а конический пояс 12 не вращается, а только вибрирует, шаровые мелющие элементы 15 постоянно вибрируют и перекатываются по коническим поясам 12 и 14, осуществляя в основном ударное и раздавливающее воздействия на твердые частицы суспензии. Роликовые мелющие элементы дополнительно реализуют эффект механического истирания частичек между ними и статором 4.

При накатывании шаровых мелющих элементов 15 на твердые недробимые частицы последние выталкивают шаровые элементы против действия центробежных сил и их составляющих, которые возвращают шаровые мелющие элементы вновь на конические пояски 12 и 14. Это вызывает вибротурбулизацию, которая может переходить в «кипящий слой». В любом случае интенсифицируются процессы диспергирования и гомогенизации обрабатываемой среды.

Периодическое перекрытие выемок 11 и пазов 13 вызывает пульсацию, турбулизацию и кавитацию, которые также интенсифицируют процессы диспергирования и гомогенизации обрабатываемой среды.



Анализ приведенных выше изобретений, а также других, не вошедших в примеры, показывает, что авторы предлагают использовать кавитационные эффекты для генерации тепла и для диспергирования твердых частиц и несмешивающихся жидкостей. Применение кавитаторов для теплогенерации нельзя признать рациональным, поскольку превращение чистой эксэргии (электрический ток, механическая энергия) в теплоту – чрезвычайно расточительный процесс. В некоторых работах приведены значения коэффициентов трансформации энергии при теплогенерации в кавитаторах – 0,75...0,85, что соответствует и нашим экспериментам. Однако это значительно ниже, чем коэффициенты трансформации энергии в электронагревателях – 0,95...0,98.

Диспергирование твердых частиц в кавитаторах позволяет получить ультрадисперсные фракции (0...10 мкм), что зачастую нельзя получить при других способах измельчения из-за высокого порога пластической текучести. Вместе с тем обработка двухфазных (твердожидкостных) сред в кавитаторах приводит к значительному износу рабочих поверхностей и к сокращению межремонтного периода. Разные типы кавитаторов изнашиваются с различной скоростью. Наименьшему износу подвергаются кавитаторы, у которых кавитационная зона развивается на некотором расстоянии от поверхностей рабочих решеток. Это происходит в кавитаторах, использующих принцип генерации ударных волн, но и в этом случае имеет место абразивный износ рабочих окон в роторах и статорах кавитаторов. Изменение профиля щелей или окон, особенно закругление и сглаживание кромок, приводит к ослаблению эффекта и снижению технических характеристик кавитатора.

Практически ни в одном патентном описании нет четкого представления об активации жидкой среды и эффектах, связанных с этим явлением. Лишь в очень малом числе изобретений содержатся смутные и расплывчатые представления об «изменении энергонасыщенности» жидкости, «стабилизации кавитации» и в ряде случаев упоминается о турбулизации потока. Однако в последних работах, связанных с новыми технологиями получения водоугольных топлив, эффект активации диспергирующей среды учитывается [180, 181]. Очевидно, что это связано с применением новой техники и получением таких эффектов при применении этой техники, которые трудно не заметить, например, увеличение реакционной способности ВУТ и его седиментационной устойчивости.

Кавитаторы широко используются для получения эмульсий, суспензий, при приготовлении красок в строительной индустрии и строи-



тельных растворов. Они известны более под названием эмульгаторов, гомогенизаторов и т. п.

Эти аппараты производятся серийно и широко рекламируются в Интернете. Однако использование кавитаторов для приготовления ВУТ с размолом угля в самом кавитаторе встречается редко из-за быстрого износа рабочих органов аппарата.

Практически кавитатор, работающий на жидких средах как эмульгатор, при правильно спроектированной зоне кавитации способен отработать до 5000 ч без ремонта. Если же нагрузить кавитатор размолом крупного угольного порошка с модой частиц на уровне 3 мм в смеси с водой, то время межремонтного периода снизится до нескольких десятков часов непрерывной работы.

При пропускании через кавитатор водоугольной смеси с размерами частиц 5...25 мкм и долей твердой фазы около 50 % известные конструкции гидродинамических кавитаторов выдерживают межремонтный период до 1000 ч.

Вместе с тем времени релаксации активированного угольного порошка после дезинтегратора и активированной междисперсной среды достаточно для образования устойчивой водоугольной системы в технологическом процессе, даже если операция смешивания происходит после этих аппаратов в быстროходном смесителе.

Приведенные выше данные получены авторами при практических исследованиях различных типов гидродинамических кавитаторов. Ниже приведены некоторые перспективные лабораторные, полупромышленные и промышленные типы кавитаторов.

На рис. 2.28 показана конструктивная схема лабораторного кавитатора.

Устройство работает следующим образом. Жидкость поступает в патрубок входа 7 кавитатора, затем винтовым насосом 3 подается на диски 4 и 5. При этом диск 4, расположенный на валу 2, вращается с постоянной частотой, обеспечивая постоянную скорость продвижения жидкости через кавитатор, а диск 5, расположенный на валу 6, вращается с регулируемой частотой в противоположном первому направлению. Обработанная жидкость направляется в патрубок выхода 8, при этом продвижение жидкости осуществляется через специальные отверстия 10 в дисках 4 и 5, причем в отверстиях происходит кавитация жидкости.

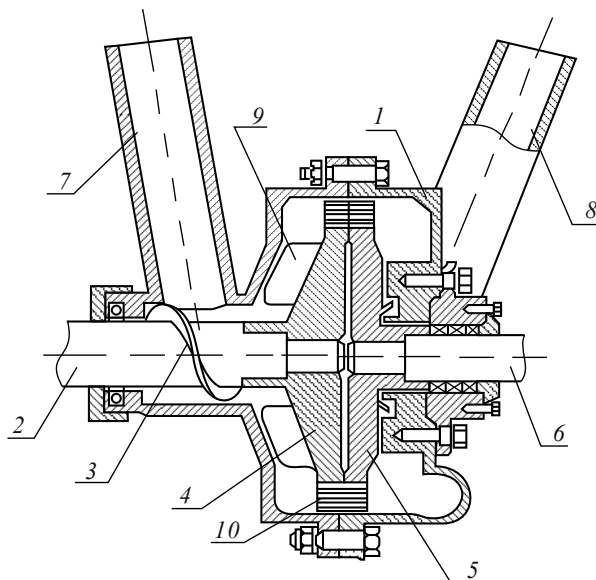


Рис. 2.28. Лабораторный кавитатор:

1 – корпус; 2, 6 – вал; 3 – винтовой насос; 4, 5 – рабочие диски; 7, 8 – патрубки входа и выхода; 9 – рабочие поверхности в виде крыльчатки; 10 – отверстие



Рис. 2.29. Промышленный кавитатор производительностью 40 т/ч ИКЖТ

На рис. 2.29 показан промышленный кавитатор производительностью 40 т/ч по ИКЖТ.



## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Теоретически и экспериментально доказано, что диспергирование угля в механических мельницах сопровождается активацией угольных частиц с аккумуляцией частично энергии дробления. Экспериментально показано, что обработка в кавитаторах жидкой фазы (воды) приводит к появлению в ней активных образований.

2. Отмечено, что при работе с активированной твердой и жидкой фазой при последующей гомогенизации их смеси образуется физико-химическая водоугольная система, которая представляет собой водоугольное топливо с повышенной реакционной способностью и устойчивостью.

3. Анализ диспергирования вещества в различных мельницах показал, что наиболее эффективная активация твердой фазы (угля) достигается в высокоскоростных мельницах ударно-скалывающего типа (дезинтеграторах), а активация жидкой фазы – в гидродинамических кавитаторах.

4. Рассмотрены вопросы расчета дезинтеграторов и кавитаторов, а также перспективные аппараты для технологического модуля.

## **ГЛАВА 3**

### **МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИКЖТ И ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВА**

#### **3.1. ВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ВУТ [2, 187, 188]**

**В** Российской Федерации отсутствует утвержденная методика сертификации водоугольного топлива. Однако в период проектирования, комплексного опробования и начальной эксплуатации ОПУ «Белово – Новосибирск» были разработаны временные технические условия на ВУТ. Эти условия были получены на основе исследовательских работ, проведенных в лабораториях Гидроуглепровода, а также при исследовании ОПУ в Донбассе, на Урале и в Подмосковье.

Временные технические условия распространяются на ВУТ из углей Кузнецкого бассейна, предназначенное для сжигания на Новосибирской ТЭЦ-5, а также в котельных и энергоустановках металлургических предприятий.

Технические требования в соответствии с временными техническими условиями приведены в табл. 3.1.

Временные технические условия устанавливают методы исследования ВУТ и компонентов топлива. Эти методы сводятся к известным методам анализа твердых и жидких топлив.

Таблица 3.1

Технические требования к водоугольному топливу

| Потребитель                                     | Показатели  |   |                    |   |   |   |                     |                 |
|---|---|---|--------------------|---|---|---|---------------------|-----------------|
|   | водоугольного топлива   |   |                    |   | качества твердой фазы<br>в водоугольном топливе |   |                     |                 |
|   | Массовое содержание твердой фазы в ВУТ при температуре 20 °С, % | Вязкость при температуре 20 °С и скорости сдвига 11 с <sup>-1</sup> , мПа · с | Стабильность, сут. | Теплота сгорания низшая $Q_n^p$ , ккал/кг | Крупность частиц (максимальная), мкм            | Предельное содержание частиц более 250 мкм, % | Зольность $A^d$ , % |                 |
|   |   |   |                    |   |   |   | сред-<br>няя        | предель-<br>ная |
| ТЭЦ-5   | Не менее 56   | Не более 800  | 30                 | Не менее 3100                             | 0...250 (350)                                   | 5   | 15                  | 17              |
| Котельные, металлургические агрегаты и др.      | Не менее 58   | Не более 2000   | 15                 | Не менее 3250                             | 0...250 (350)                                   | 5   | 15                  | 17              |
| То же (при изготовлении ВУТ из угольного шлама) | Не менее 60   | Не более 2000   | 15                 | Не менее 2990                             | 0...250 (350)                                   | 5   | 23                  | 40              |

**Примечание.** ВУТ бракуют при следующих условиях:

- низшая теплота сгорания меньше 2990 ккал/кг;
- увеличение максимальной крупности частиц свыше 350 мкм;
- содержание в ВУТ твердой фазы ниже 57 %;
- увеличение вязкости свыше 800 (2000) мПа · с;
- снижение стабильности от расслоения менее 30 сут.



**Отбор и подготовка пробы ВУТ** преследует цель максимальной представительности пробы твердого топлива, как компонента ВУТ, и максимального усреднения пробы жидкого ВУТ. Порядок отбора проб такой же, как для проб твердого и жидкого топлива при проведении лабораторного анализа.

Пробу для общего анализа (примерно 250 г) высушивают до состояния, близкого к воздушно-сухому. Для этого суспензию выливают на противень тонким слоем и ставят в предварительно нагретый сушильный шкаф, где сушат ее при температуре от 30 до 55 °С. Затем пробу охлаждают на воздухе и измельчают до крупности частиц менее 200 мкм. Измельченную пробу сокращают до массы 100...150 г с помощью лабораторного делителя или вручную. В результате получают аналитическую пробу, по которой определяют содержание влаги, золы, серы и мышьяка, выход летучих веществ, теплоту сгорания.

Для лабораторных исследований используют навески топлива из пробы. Перед каждым взятием навески пробу тщательно перемешивают в течение нескольких минут по всему объему. По возможности навеску отбирают из разных мест пробы. Навески взвешивают при крупности частиц топлива менее 350 мкм с погрешностью не более 0,001 г, при крупности менее 200 мкм – не более 0,0002 г.

**Содержание общей влажности** определяют с использованием метода одноступенчатого просушивания лабораторной пробы при 105...110 °С по ГОСТ 27314–87 либо ускоренного метода высушивания при  $160 \pm 5$  °С по ГОСТ 11014–81.

Из общелабораторной пробы в бюксы отвешивают приблизительно по 1,0 г суспензии. Открытыми их помещают в сушильный шкаф, предварительно нагретый до температуры 105...110 °С (либо 160 °С), и сушат до получения постоянной массы. Контрольное просушивание проводят в течение 30 мин до тех пор, пока расхождение между двумя последними взвешиваниями не будет превышать 0,1 % массы пробы. За окончательный результат принимают самую низкую массу.

Массовая доля твердой фазы в ВУТ определяется в соответствии с выражением

$$C_T = 100 - W^P, \%, \quad (3.1)$$

где  $W^P$  – влажность топлива по рабочей массе.



Содержание влаги в аналитической пробе твердого топлива, используемого для получения ВУТ, доведенной до воздушно-сухого состояния, является величиной относительно постоянной, поэтому качество топлива предпочтительнее определить из такой пробы.

Влажность аналитической пробы ВУТ определяют путем стандартных методов при высушивании пробы ВУТ в сушильном шкафу при 105...110 °С до постоянной массы по ГОСТ 27314–87 либо путем ускоренного метода сушки при 160 °С по ГОСТ 11014–81 (табл. 3.2).

Таблица 3.2

**Условия определения влажности аналитической пробы ВУТ  
(навеска 1,0 г, измельчение до класса 0,2 мм)**

| Температура просушивания, °С | Продолжительность основного просушивания, мин, для ВУТ |               | Контрольное просушивание, мин |
|------------------------------|--|---------------|-------------------------------|
|                              | из каменных углей                                      | из антрацитов |                               |
| 105...110                    | 30   | 30            | 30*                           |
| 160 ± 5                      | 5  | 5             | Нет                           |

\* Повторять, пока потеря массы между двумя просушиваниями не будет превышать 0,001 г.

**Определение гранулометрического состава** производят вручную путем мокрого отсева на ситах либо на механическом встряхивателе по ГОСТ 2093–82. При наличии в лаборатории лазерного фракционно-гранулометра «GILAS-715» гранулометрический состав ВУТ получают следующим путем. Осуществляют мокрый рассев пробы на сите с диаметром отверстий 200 мкм и затем проводят анализ класса 200 мкм на гранулометре, который позволяет определить выход классов от 1 до 192 мкм и срединный диаметр  $d_{ср}$ .

**Определение зольности** водоугольного топлива выполняют с помощью стандартного метода (ГОСТ 11022–90), который заключается в полном сжигании навески ВУТ (озолении), прокаливании зольного остатка до постоянной массы при температуре  $815 \pm 15$  °С и нахождении массы образовавшейся золы. Метод можно реализовать в двух вариантах, различающихся скоростью озоления и, следовательно, общей продолжительностью анализа (медленный и ускоренный).



При получении существенно различающихся результатов центральным является метод медленного озоления.

Содержание золы, %, на сухое состояние топлива  $A^d$  рассчитывают по формуле (ГОСТ 27313–87)

$$A^d = A^a \frac{100}{100 - W^a}, \quad (3.2)$$

где  $W^a$  – влажность аналитической пробы;  $A^d$  – содержание золы в аналитической пробе.

Содержание золы, %, при рабочем состоянии водоугольного топлива определяют при помощи выражения:

$$A^p = A^d C_T, \quad (3.3)$$

где  $C_T$  – массовая доля твердой фазы в ВУТ.

**Определение выхода летучих веществ** производят по потере массы исходной навески за счет удаления из нее влаги в результате нагревания топлива до температуры  $850 \pm 10$  °С в течение 7 мин без доступа воздуха (ГОСТ 6382–80).

Выход летучих веществ (%) на сухое  $V^d$  и сухое беззольное  $V^{\text{daf}}$  состояния топлива определяют согласно ГОСТ 27313–87:

$$V^d = V^a \frac{100}{100 - W^a}; \quad (3.4)$$

$$V^{\text{daf}} = V^a \frac{100}{100 - (W^a + A^a)}. \quad (3.5)$$

Выход летучих веществ на рабочую массу ВУТ вычисляют при помощи выражения

$$V^p = V^d C_T. \quad (3.6)$$

**Определение теплоты сгорания** ВУТ выполняют по единому стандартному методу (ГОСТ 147–74) – сжиганием навески топлива в

атмосфере сжатого кислорода в герметически закрытом металлическом сосуде – калориметрической бомбе.

Фактическая теплота сгорания топлива оказывается намного ниже, чем величина, определяемая в калориметрической бомбе при сжигании аналитической пробы (теплота сгорания по бомбе  $Q_6^a$ ). Для того чтобы приблизить экспериментальные значения  $Q_6^a$  к реальным, вводят поправки, получая таким образом следующие показатели: высшую  $Q_B^a$  и низшую  $Q_H^a$  теплоту сгорания.

Высшая теплота сгорания – это теплота сгорания, определенная по бомбе, уменьшенная на значение теплоты образования и растворения серной и азотной кислоты. Высшую теплоту сгорания аналитической пробы топлива  $Q_B^a$ , ккал/кг, вычисляют по формуле (ГОСТ 147–74):

$$Q_B^a = Q_6^a - (\beta S_6^a + \alpha Q_6^a), \quad (3.7)$$

где  $\beta$  – теплота образования серной кислоты из  $SO_2$  и растворения ее в воде, численно равная 22,5 ккал/кг в расчете на 1 % серы;  $S_6^a$  – содержание серы в «смыве бомбы». Разрешается использовать вместо этой величины  $S^a$  (общее содержание серы в аналитической пробе), если  $S^a < 4$  %, а  $Q_6^a > 3496$  ккал/кг;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий теплоту образования и растворения азотной кислоты, равный 0,001 для тощих углей и антрацитов и 0,0015 – для всех остальных топлив.

Низшую теплоту сгорания аналитической пробы топлива  $Q_H^a$ , ккал/кг, вычисляют по формуле (ГОСТ 27313–87)

$$Q_H^a = Q_B^a - \gamma(W^a + 8,94H^a), \quad (3.8)$$

где  $\gamma$  – теплота нагревания и испарения воды в расчете на 1 % воды ( $\gamma = 5,86$  ккал/кг и  $\gamma = 24,42$  кДж/кг при выражении результатов анализа соответственно);  $H^a$  – общее содержание водорода в аналитической пробе.



Низшую теплоту сгорания по рабочей массе топлива  $Q_H^p$  определяют по формуле (ГОСТ 27313–87):

$$Q_H^p = Q_B^p - \gamma(W^p + 8,94H^p), \quad (3.9)$$

где  $H^p$  – общее содержание водорода в топливе по рабочей массе.

Величину  $Q_B^p$  рассчитывают по высшей теплоте сгорания аналитической пробы (ГОСТ 147–74):

$$Q_B^p = Q_B^a \frac{100 - W^p}{100 - W^a}. \quad (3.10)$$

Вариант расчета, идентичный указанному выше, может быть представлен в следующем виде:

$$Q_B^p = Q_B^d C_T. \quad (3.11)$$

Теплоту сгорания топлива по сухой массе  $Q_B^d$  вычисляют по формуле (ГОСТ 27313–87)

$$Q_B^d = Q_B^a \frac{100}{100 - W^a}. \quad (3.12)$$

Общее содержание водорода по рабочей массе топлива определяют с помощью выражения (ГОСТ 27313–87)

$$H^p = H^a \frac{100 - W^p}{100 - W^a}. \quad (3.13)$$

Теплоту сгорания в бомбе при сжигании аналитической пробы  $Q_6^a$  пересчитывают на низшую теплоту сгорания топлива по рабочей массе  $Q_H^p$ .

Существует приближенный теоретический метод расчета  $Q_{\text{H}}^{\text{P}}$ . Зная низшую теплоту сгорания исходного для ВУТ угля  $Q_{\text{H1}}^{\text{P}}$ , по указанному в ГОСТ 27313–87 выражению можно определить приближено значение теплоты сгорания ВУТ  $Q_{\text{H2}}^{\text{P}}$  по рабочей массе:

$$Q_{\text{H2}}^{\text{P}} = \frac{100 - W_2^{\text{P}}}{100 - W_1^{\text{P}}} \left( Q_{\text{H1}}^{\text{P}} + \gamma W_1^{\text{P}} \right) - \gamma W_2^{\text{P}}, \quad (3.14)$$

где  $W_1^{\text{P}}$  и  $W_2^{\text{P}}$  – общая влажность соответственно угля и ВУТ по рабочей массе.

**Определение общего содержания серы.** Общее содержание серы S (суммарное содержание серы в органической и минеральной массе ВУТ) определяют с помощью классического метода Эшка, признанного центральным (ГОСТ 8606–72).

Метод Эшка заключается в сжигании навески водоугольного топлива путем спекания его со смесью оксида магния и безводного углекислого натрия (смесь Эшка) в окислительной атмосфере при температуре  $815 \pm 25$  °С. Образовавшиеся сульфаты натрия и магния растворяются в воде (выщелачивание); сульфат-ион количественно осаждается в солянокислой среде хлористым барием в виде сернокислого бария. Масса осадка  $\text{BaSO}_4$  соответствует содержанию общей серы в навеске ВУТ.

Массовую долю общего содержания серы в аналитической пробе  $S^{\text{a}}$  топлива, %, вычисляют согласно ГОСТ 8606–72, а затем пересчитывают на сухое состояние  $S^{\text{d}}$  топлива (ГОСТ 27313–87) по формуле

$$S^{\text{d}} = S^{\text{a}} \frac{100}{100 - W^{\text{a}}}, \quad (3.15)$$

где  $W^{\text{a}}$  – общая влажность аналитической пробы ВУТ.

Общее содержание серы, %, по рабочей массе водоугольного топлива составит

$$S^{\text{P}} = S^{\text{d}} C_{\text{T}}, \quad (3.16)$$



**Определение содержания мышьяка** в аналитической пробе  $As^d$  – водоугольного топлива производят согласно ГОСТ 10478–75, который позволяет установить массовую долю мышьяка в пределах 0,0005...0,01 %.

Содержание мышьяка, %, на сухую массу топлива определяют по ГОСТ 27313–87:

$$As^d = As^a \frac{100}{100 - W^a}. \quad (3.17)$$

Содержание мышьяка по рабочей массе ВУТ, %:

$$As^p = As^d C_T. \quad (3.18)$$

**Определение вязкости.** Водоугольное топливо является неньютоновской жидкостью, и обычная для ньютоновских жидкостей зависимость напряжения сдвига  $\tau$  от его скорости  $\dot{\gamma}$  и вязкости, т. е.

$$\tau = \mu \dot{\gamma}, \quad (3.19)$$

неприменима для ВУТ. Согласно практике транспорта и использования водоугольного топлива принята реализуемость реологической модели одного из двух основных типов, описанных в главе 1 (модель Эйнштейна–Томаса либо модель Бингама).

Для определения реологических свойств на ротационных вискозиметрах (типа «Реомат» или «Реотест») проводят замеры в указанной последовательности:

- устанавливают диапазон скоростей деформации, перекрывающий рабочий диапазон, причем шаг замеров может быть неравномерным – более плотным в области преимущественного использования ВУТ;
- измеряют напряжение сдвига на всем диапазоне фиксированных настроек скоростей деформации по методике, указанной в паспорте прибора.

Затем, используя численный метод линейной аппроксимации, рассчитывают начальное напряжение сдвига  $\tau_0$  и коэффициент структурной вязкости  $\mu_p$ .

С помощью численного метода аппроксимации через минимизацию определяют меру консистенции жидкости  $k$  и параметр нелинейности  $n$ . При этом может быть вычислена кажущаяся (эффективная) вязкость по формуле

$$\mu_{\text{эф}} = k |\dot{\gamma}|^{n-1}. \quad (3.20)$$

### **3.2. ЧАСТНАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВУТ НИЛ ОАО «НОВОСИБИРСКТЕПЛОЭЛЕКТРОПРОЕКТ» И ООО «РАДЕКС» [112, 114]**

Особенностью технологии приготовления ВУТ ООО «Радекс» является использование кавитаторов для диспергирования и гомогенизации топливной системы.

По схеме приготовления водоугольная смесь в необходимой пропорции проходит последовательно через трехступенчатую обработку в трех кавитаторах: кавитатор грубой обработки, кавитатор средней обработки и кавитатор тонкой обработки. В конце этой технологической цепочки получают ВУТ, которое превосходит по ряду технологических показателей, в частности по стабильности, топливо, получаемое по традиционной технологии.

Методика исследования ВУТ основана на временных технических условиях для ВУТ [1], однако в связи с оригинальной технологией производства имеет некоторые особенности, которые рассмотрены ниже.

Одним из тестов, обладающих в силу ряда причин низкой точностью, является тест на стабильность топлива. Продолжительность стабильного состояния топливной системы определяется экстраполяцией результатов наблюдения на начальном участке хранения на все время существования топлива.

Тест на стабильность ВУТ проводится следующим способом: готовое топливо наливают в бюретку высотой ~300 мм, где оно хранится закрытым в течение некоторого времени. Во время теста за топливом ведется наблюдение. Из рис. 3.1 [10] следует, что за время наблюдения (96 ч) топливо в основном объеме приобрело слабый (менее 15 % относительных) практически линейный градиент концентрации без признаков какого-либо межфазного расслоения. При этом часть воды



(менее 3 % общего объема ВУТ и чуть более 7 % ее исходного объема) оказалась вытесненной в четко отграниченный прозрачный, без сколько-либо существенного количества твердой фазы, слой над остальной массой ВУТ.

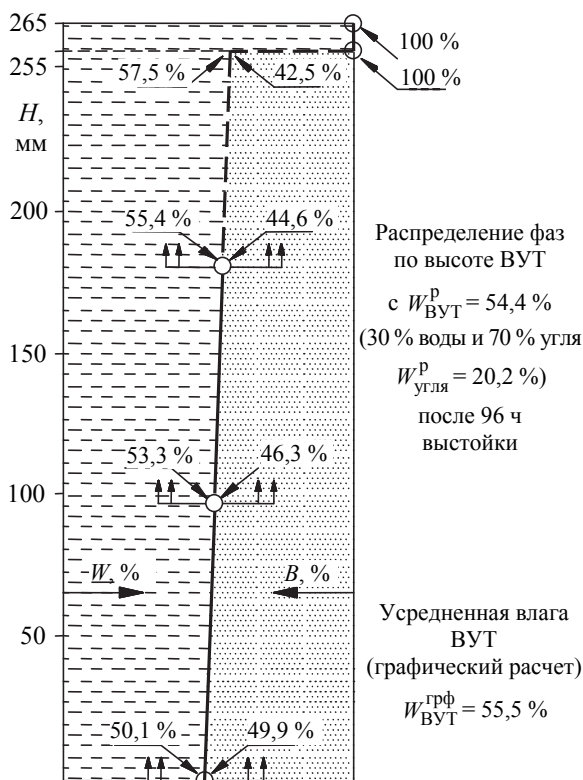


Рис. 3.1. Распределение фаз по высоте ВУТ (96 часов наблюдения)

Достаточно выраженная стабильность состава ВУТ во времени очень хорошо иллюстрируется пробой ВУТ<sub>хран</sub>, хранившегося в расходном баке более девяти месяцев в его мертвом объеме высотой 750 мм от дна до уровня врезки всасывающих патрубков насосов подачи ВУТ в котел. Содержимое мертвого объема практически не подвергалось механическому побуждению, поскольку безнапорная струя



новых порций ВУТ, периодически вливающих в бак диаметром 8 м, не перемешивала сколько-нибудь заметно содержимое бака.

Даже при таких необычных условиях хранения в данной части слоя ВУТ<sub>хран</sub> твердых отложений не образовалось. При открытии дренажной задвижки топливо с консистенцией густой сметаны самопроизвольно вытекало в пробоотборник, причем отмеченное выше «выжимание» влаги продолжалось в процессе формирования изучаемого материала, по-видимому, все более низкими темпами, о чем свидетельствует затухающий характер зависимости изменения влажности данных слоев ВУТ от времени (рис. 3.2).

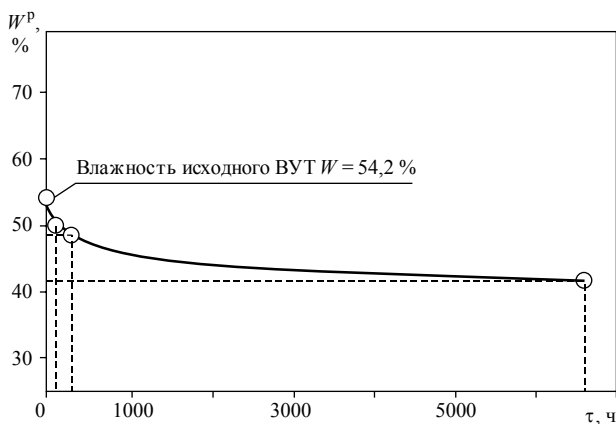


Рис. 3.2. Влажность придонного слоя водоугольного топлива в зависимости от времени его неподвижного хранения

Другим оригинальным элементом в методике исследования ВУТ было исследование фракционного состава твердой фазы после обработки в кавитаторе I и в кавитаторе II. На рис. 3.3 показаны гистограммы фракционного состава после I кавитатора ( $V$ ) и после II кавитатора ( $S$ ), полученные методом компьютерного микроскопирования. Для исследования был выбран уголь марки СС. Средним размером и для  $V$ , и для  $S$  был размер  $\sim 50$  мкм. Исследование распределения зоны показало, что крупные фракции относительно богаче минеральной частью, чем мелкие, и эта разница значительна.

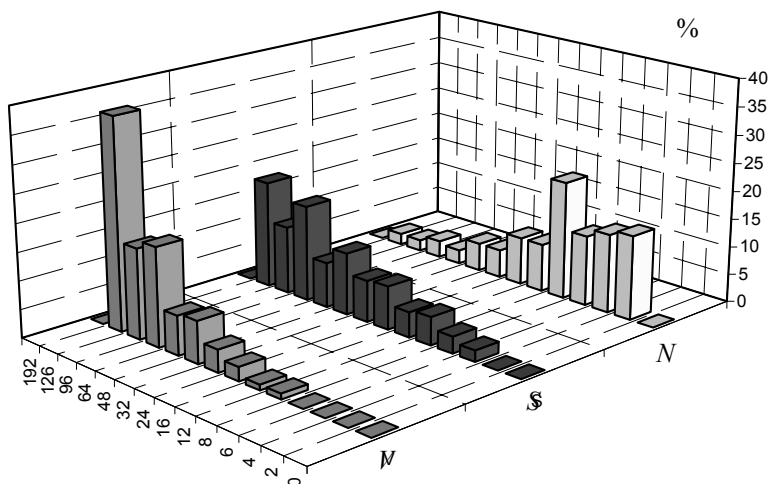


Рис. 3.3. Фракционный состав твердой фазы (уголь СС) после кавитатора грубой обработки ( $I$ ) и последующей обработки в кавитаторе II ( $S$ ). Фракционный состав твердой фазы (уголь Д) после обработки в кавитаторе тонкой обработки ( $N$ )

Здесь же представлена гистограмма угля марки Д мелкого помола (обработка в кавитаторе), серия  $N$ , которая стала как бы зеркальным отражением гистограммы  $S$ . Это необычное распределение интересно тем, что основная доля минеральной части здесь сосредоточена в частичках размером до 15 мкм. Причиной этого несоответствия, возможно, служит то, что уголь марки Д содержит большое количество легко распускающегося глинистого компонента (алевровита), который в процессе мокрого обогащения (и рассевов) вымывается в мелкую фазу, показывая при типовом определении повышенную зольность.

### 3.3. УНИФИЦИРОВАННАЯ МЕТОДИКА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА ПО УТИЛИЗАЦИИ УГЛЯ (ЯПОНИЯ)

Ниже приводится краткое описание методики. В качестве начальных операций с пробой ВУТ рассматриваются: обработка полученной пробы, сохранение и предварительная обработка пробы.

В каждой из этих операций изучались методические указания, процедура измерения, запись и приложения. Такая форма исполнения и регистрации операций принята во всех последующих стадиях исследования ВУТ.

Далее регламентируется экспериментальное определение теплотворной способности, концентрации твердой фазы, плотности ВУТ, реологических характеристик и исследуется вязкость, фракционный состав угля в ВУТ, зола, показатель pH и стационарная стабильность ВУТ.

Описанные в методике исследования ВУТ могут быть расширены или сокращены в соответствии с целями анализа, могут включать в себя дополнительные процедуры исследования других характеристик ВУТ.

Основная цель описанной методики – инженерное сопровождение технологических операций производства и использования ВУТ, но вместе с тем рассматриваемая методика может применяться и для научных исследований как основанная на верифицированных методах.

Ниже приведены методики исследования стационарной стабильности ВУТ, включенные в унифицированную методику и принятые в некоторых топливных компаниях Японии (3.5, 3.6 и 3.7).

### **3.4. ДЕРИВАТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИКЖТ (ВУТ) [189 – 192]**

Дериватографический анализ топлива производится с использованием установки для научных исследований – дериватографа, который позволяет проводить комплексный анализ твердого топлива. В дериватографе используются три метода термического анализа: дифференциально-термический, термогравиметрический и дифференциально-термогравиметрический.

Благодаря своим возможностям дериватографический анализ получил широкое признание во многих областях науки. Основной особенностью этого анализа является большой объем информации по процессам термической деструкции топлива. Вся информация связана.

Хотя конечным результатом исследований становятся данные по кинетике процесса деструкции в зависимости от температуры и време-



ни – энергии активации и скорости реакции окисления, большой интерес представляют также и отдельные кривые.

Кривая ДТА (дифференциально-термического анализа) регистрирует прохождение эндо- и экзотермических реакций в процессе деструкции твердого топлива (рис. 3.4).

Кривая ТГА (термогравиметрического анализа) регистрирует изменение массы вещества в зависимости от температуры и времени (рис. 3.5).

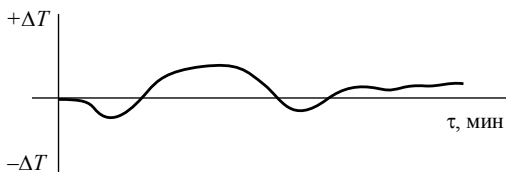


Рис. 3.5. Кривая дифференциально-термического анализа

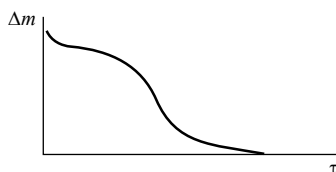


Рис. 3.4. Кривая термогравиметрического анализа

Графическое дифференцирование этой кривой позволяет получить скорость реакции термодеструкции. Поскольку графическое дифференцирование не отличается большой точностью, был разработан метод дифференциально-термогравиметрического анализа, который наряду с методом ДТА был заложен в схему установки дериватографирования образцов топлива (рис. 3.6).

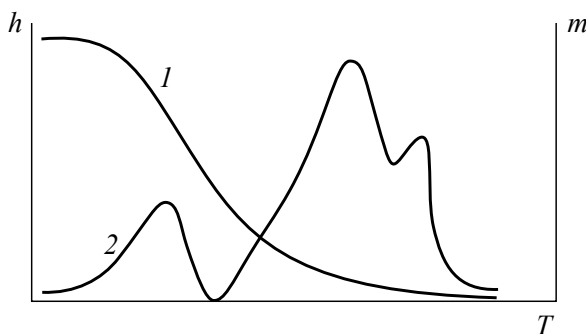


Рис. 3.6. Кривые, полученные методом дифференциально-термогравиметрического анализа:

1 – ТГ; 2 – ДТГ

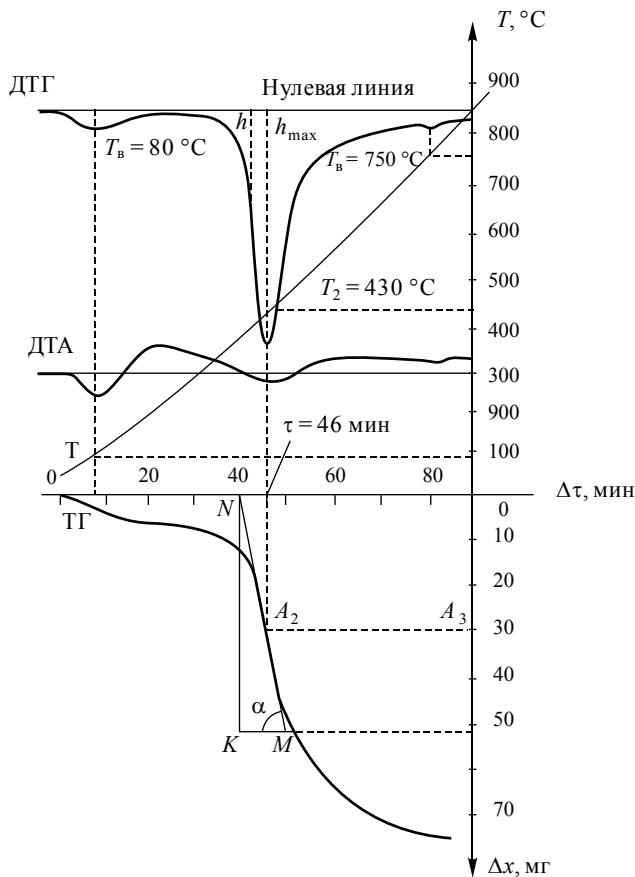


Рис. 3.7. Дериватограмма каменного угля

Суммарная дериватограмма показана на рис. 3.7 (каменный кузнецкий уголь марки Г, дериватограф QR-1500).

### РАСЧЕТ ДЕРИВАТОГРАММЫ

**Кривая Т.** Устройство прибора позволяет вести программный нагрев образца до 250, 500, 1000, 1500 °С. В зависимости от конечной температуры нагрева выбирается температурная калибровочная сетка, которая наносится автоматически на дериватограмму до начала эксперимента. Кривая Т наглядно иллюстрирует скорость нагрева образца



во время опыта. Программатор дериватографа обеспечивает линейный нагрев при всех скоростях нагрева. В любой момент времени температура образца  $T$  определяется по точке пересечения кривой Т с калибровочной сеткой. Например, для того чтобы определить температуру в точке  $A$  по кривой ДТГ, необходимо эту точку перенести на кривую Т (точка  $B$ ), а затем на шкалу калибровочной сетки (точка  $C$ ). Таким образом, температура в точке  $A$  равна  $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Кривая ТГ.** Для количественного определения убыли массы используется калибровочная сетка по изменению массы. Цена деления сетки зависит от чувствительности весов и выбирается с учетом предполагаемой убыли массы (табл. 3.3). Убыль массы в любой момент времени определяется по точке пересечения кривой ТГ с калибровочной сеткой. Например, найдем убыль массы в течение 46 мин нагрева (точка  $A$ ).

Таблица 3.3

**Соотношение между чувствительностью весов и шкалой калибровочной сетки**

| Чувствительность весов,<br>мг | Цена деления шкалы<br>убыли массы, мг | Масштабный<br>коэффициент,<br>мг/(мин · мм) |
|-------------------------------|---------------------------------------|---|
| 20                            | 0,2                                   | 0,010                                       |
| 50                            | 0,5                                   | 0,025                                       |
| 100                           | 1,0                                   | 0,050                                       |
| 200                           | 2,0                                   | 0,100                                       |
| 500                           | 5,0                                   | 0,200                                       |

За 46 мин температура образца поднялась до  $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что привело к убыли массы на величину  $\Delta x$ . Перенесем точку  $A_1$  на кривую ТГ (точка  $A_2$ ), а затем на шкалу убыли массы (точка  $A_3$ ). Если  $T_0$  – температура в начальный момент опыта,  $T_1$  – температура в момент времени  $t_1$ , то можно записать, что убыль массы в интервале температур от  $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T_1 = 430\text{ }^{\circ}\text{C}$  равна 30 мг, или  $\Delta x_{T_0-T_1} = 30\text{ мг}$ . Так как скорость в любой точке кривой есть тангенс угла наклона касательной, проведенной к этой точке, то  $V = \text{tg } \alpha$ .

Для нахождения скорости убыли массы по кривой ТГ необходимо провести касательную к выбранной точке и найти значение  $\operatorname{tg} \alpha$ . Например, определим скорость убыли массы в точке  $A_2$ . Проведем касательную  $MN$  и построим треугольник  $MNK$ , в котором катет  $NK$  характеризует убыль массы, а катет  $MK$  – время. Тогда

$$V_{A_2} = \frac{NK}{KM} = \frac{\Delta x_{nk}}{\Delta t} = \frac{52 \text{ мг}}{10 \text{ мин}} = 5,2 \text{ мг/мин}. \quad (3.21)$$

**Кривая ДТГ.** Отклонение кривой от нулевой линии пропорционально скорости убыли массы:  $h \sim V$ , или  $V = Mh$ , где  $h$  – отклонение, мм (измеряется линейкой);  $M$  – масштабный коэффициент, или коэффициент пропорциональности между кривой ТГ и ДТГ, мг/(мин · мм). Масштабный коэффициент зависит от чувствительности весов и гальванометров и находится из условий эксперимента.

Таким образом, для того чтобы найти скорость по кривой ДТГ, достаточно измерить величину  $h$  и выбрать соответствующий коэффициент  $M$ . Значения скорости, вычисленные по кривым ТГ и ДТГ, будут незначительно отличаться друг от друга.

**Кривая ДТА.** Характеристические температуры теплоэффектов определяются по кривой ДТА путем проекции интересующей точки на кривую Т и на шкалу температур.

### 3.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПО МЕТОДУ РАЗЛИЧИЙ МЕЖДУ МАКСИМАЛЬНОЙ И МИНИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ (ФИРМА «UBE INDUSTRIES») [1] (рис. 3.8)

#### Общие сведения

Данный метод определения различия между верхней и нижней концентрацией предполагает замер распределения концентрации угля в вертикальном направлении при определенном времени стационарной выдержки для получения показателя стационарной стабильности.

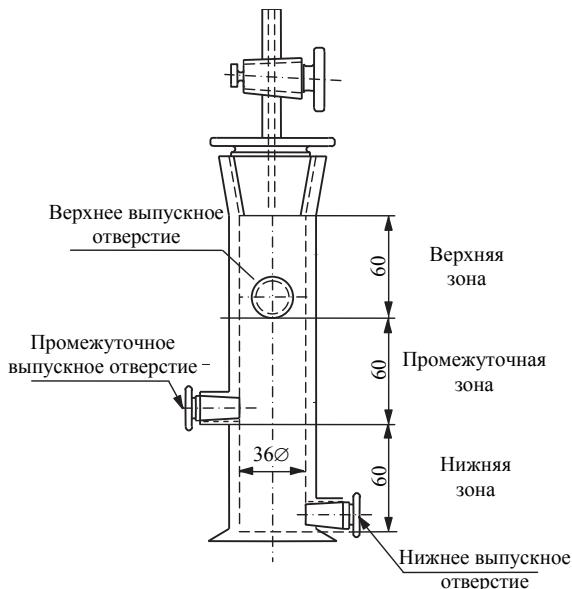


Рис. 3.8. Метод определения различия между верхней и нижней концентрацией испытываемой пробы (детализация)

### Оборудование для замеров

- Сосуд. Цилиндрический стеклянный (исключительного назначения) с внутренним диаметром 36 мм и высотой 180 мм с выпускными отверстиями для жидкости, выполненными на высоте 60 и 120 мм от дна, общее количество – три.
- Условия стационарной выдержки. Температура выдержки комнатная. Время выдержки – 14 дней, 1 и 2 месяца.

### Процедура замеров

1. С помощью лопатки слегка взболтать содержимое сосуда до получения однородного состава испытываемой пробы.
2. Поместить пробу, концентрация угля которой была замерена, в три сосуда на высоту заполнения 180 мм и содержать неподвижно при комнатной температуре в течение 14 дней, одного месяца и двух месяцев.
3. По истечении этого времени (при этом сосуд расположен вертикально) открыть верхнее выпускное отверстие и выпустить часть



пробы, находящейся между отметками 120 и 180 мм по высоте. Затем открыть промежуточное выпускное отверстие и выпустить содержимое сосуда между отметками 60 и 120 мм и, наконец, открыть нижнее отверстие у дна и выпустить оставшуюся часть. При этом выпущенная из каждого отверстия проба поступает в соответствующий сосуд, слегка взбалтывается до получения однородного состава.

4. Замерить концентрацию угля каждой выпущенной пробы.

#### **Запись результатов замеров**

1. Концентрация угля каждой выпущенной пробы. Записать процентное содержание концентрации угля из проб верхней, промежуточной и нижней с точностью до первого десятичного знака.

2. Разница верхней и нижней концентрации. Эта разница в процентах записывается с точностью до первого десятичного знака.

### **3.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ (МЕТОД ИСПЫТЫВАЕМОГО СОСУДА), ФИРМА «JAPAN COM» [1]**

#### **Общие сведения**

Целью испытания этим методом является измерение веса осаждающихся флокул и приращения концентрации осажденного осадка для получения показателей стационарной стабильности. При испытании используются процедуры ускорения и усиления. Метод испытания в сосудах уникален, разработан фирмой «Japan COM» в соответствии с существующим методом испытания CWM для определения стационарной стабильности ВУТ посредством производственного контроля, количества угля и добавок, которые вот уже несколько лет применяются на практике для оценки стационарной стабильности. Однако данный метод не находится в существующих коммерческих стандартах ВУТ.

#### **Оборудование для замеров**

1. Бутылка с широким горлышком из полиэтилена или акриловой смолы емкостью 500 мл.

2. Изотермическая воздушная ванна: поддерживается при 25 °С.

3. Весы с непосредственным считыванием показаний: измерительная способность 1000 г и более, чувствительность 0,01 г.



4. Сито: отверстие 1000 мкм, 75 мм,  $\varnothing \times 45$  ммН (в соответствии со стандартом Z 8801).

5. Прочее: штатив, приемные части, прямоугольная подставка и секундомер.

### Условия замера

1. Постоянная температура, 25 °С.
2. Постоянное время выдержки, 7 и 14 дней.
3. Угол наклона потока и время, 60° в течение 60 мин, и 90° в течение 90 мин.

### Процедуры замера (см. иллюстрации) (рис. 3.9)

1. С помощью лопатки слегка взболтать содержимое до получения однородного состава пробы.

2. Поместить пробы ( $400 \pm 0,1$  г), концентрация твердого вещества которых была замерена, в две бутылки, предварительно замерив их вес с точностью до 0,1 г; плотно закрыть и поставить в изотермическую воздушную ванну при 25 °С на 7 и 14 дней соответственно.

3. По истечении этого времени открыть бутылки (если они из полиэтилена, отрезать ножом на прямолинейном участке бутылки), затем поставить на штатив и держать в течение 10 мин под углом в 60° и далее в течение 10 мин под углом в 90°.

4. Истекающий из бутылки поток поступает на сито (отверстие 1000 мкм), вес которого замерен с точностью до 0,01 г, и приемную чашу.

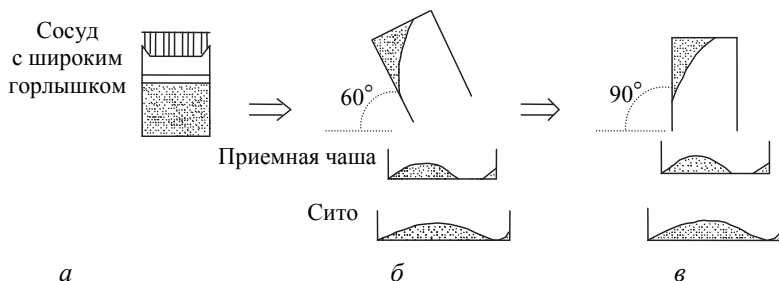


Рис. 3.9. Пояснительная иллюстрация:

*a* – стационарный режим в течение 7 и 14 дней; *б* – истечение продолжительностью 10 мин; *в* – истечение продолжительностью 10 мин

5. Замерить бутылку и сито после истечения с точностью до 0,1 г, как можно быстрее вычесть вес бутылки и сита из них, чтобы получить остаток в бутылке и остаток на сите соответственно.

6. Замерить концентрацию твердого остатка в бутылке, чтобы получить разницу от первоначальной концентрации твердого вещества в пробе ВУТ.

#### **Запись результатов замера**

1. Значение осаждения флоккул (как сумма следующих ① и ②).

① Значение твердого осадка; процентное содержание остаточного веса в бутылке от общего веса пробы (400 г) записывается с точностью до первого десятичного знака.

② Значение мягкого осадка; процентное отношение остаточного веса на сите к общему весу пробы (400 г) записывается с точностью до первого десятичного знака.

2. Разница концентрации твердого осадка.

Разница (%) между начальной концентрацией твердого образца ВУТ и концентрацией остаточного твердого вещества в бутылке записывается с точностью до первого десятичного знака.

### **3.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПО МЕТОДУ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СЕДИМЕНТАЦИИ (ФИРМЫ «JGC CWM» И «WEST JAPAN CWV») [1]**

ВУТ представляет собой водоугольную смесь при концентрации твердого вещества свыше 70 % и хорошем распределении крупности частиц. Путем оптимизации этого распределения и применения соответствующих добавок в ВУТ в определенном объеме можно получить устойчивое ВУТ с превосходными характеристиками текучести и минимальной седиментацией частиц угля.

Поскольку изменение концентрации и вязкости, а также образование осадка из-за седиментации угольных частиц в ВУТ весьма отрицательно воздействуют на хранение, транспортирование и сжигание ВУТ, устойчивые характеристики ВУТ являются существенным фактором при применении этого вида топлива.



Поэтому для получения высокостабильного ВУТ производители должны выбрать экономичную технологию измельчения угля, соответствующие добавки и их количество. Необходимо установить корреляцию между условиями производства ВУТ, такими как гранулометрический состав твердого вещества, вид и количество добавок, и соответствующая стабильность ВУТ.

Таким образом, путем получения стабильности ВУТ и ее количественной оценки можно способствовать конкретному технологическому прогрессу, в том числе экономичному получению ВУТ в соответствии с требованиями применения, хранения и транспортирования в зависимости от его стабильности.

Ранее водоугольные смеси с относительно низкими концентрациями твердого вещества помещались в прозрачный цилиндр с внутренним диаметром 60 мм и высотой 1 м и подвергались испытанию стационарной выдержкой с последующим замером высоты отстоявшейся в зависимости от времени части и расчетом скорости седиментации.

Поскольку скорость седиментации угольных частиц в ВУТ весьма мала и отстоявшуюся часть невозможно замерить, не представляется возможным определить скорость седиментации путем применения первоначального метода стационарной выдержки. Таким образом, в настоящее время не существует количественной оценки стационарной стабильности ВУТ.

В данной главе мы представляем нашу технологию, по которой сосуды, содержащие ВУТ, после стационарной выдержки в течение определенного времени переворачиваются и производится три пробы, состоящие из ВУТ, которое выпускалось из сосудов в течение трех секунд после переворачивания, и ВУТ, выпущенного из сосуда в течение от 3 с до 5 мин. В результате можно получить выражение стационарной стабильности ВУТ и седиментации угольных частиц путем определения скорости отложения угольных частиц из количества и содержания этих трех проб.

### **Скорость отложения угольных частиц**

Полиэтиленовый сосуд (обычно 500 см<sup>3</sup>), в котором находилось ВУТ, подвергался определенное время стационарной выдержке и затем переворачивался, после чего ВУТ переливалось в другой сосуд в течение 3 с и после – в другой сосуд, пока не проходило 5 мин после

первого выпуска. В данном случае ВУТ, выпущенное в первые 3 с, сохраняло относительно нормальные характеристики, а топливо, выпущенное за период от 3 с до 5 мин, представляло собой отложившееся ВУТ, называемое мягким осадком, слегка вязким, а ВУТ, прилипшее к сосуду, представляло собой отложившееся топливо, называемое твердым осадком.

При этом продолжительность первого выпуска в 3 с определяли экспериментально, принимая во внимание возможное время операции в связи с тем, что ВУТ вязкостью около  $1000 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ , содержащееся при  $20^\circ \text{C}$ , выливали в полиэтиленовый сосуд ( $500 \text{ см}^3$ ), который затем переворачивали на время, чтобы выпустить ВУТ и завершить его выпуск после одной секунды.

Кроме того, 5 мин второго выпуска определялись как самое короткое время, не вызывающее удаления воды из ВУТ в сосуде, – экспериментальное подтверждение того, что ВУТ не было полностью выпущено из сосуда после прохождения 5 мин.

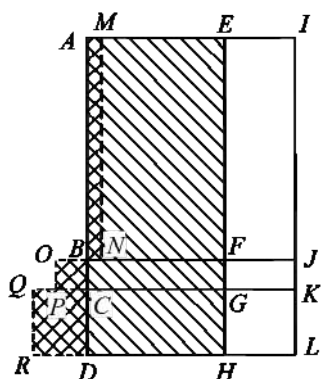


Рис. 3.10. Диаграмма разделения зон после стационарной выдержки ВУТ

На рис. 3.10 представлена диаграмма, на которой показаны три зоны разделения после стационарной выдержки ВУТ. На этом рисунке участки *MNJI*, *OPKJ* и *QRLK* показывают ВУТ, выпущенное за 3 с, выпущенное в интервале от 3 с до 5 мин, и ВУТ, которое осталось в сосуде в виде осадка после прохождения 5 мин соответственно. При этом заштрихованные участки показывают уголь, а незаштрихованные – воду. Эти участки представляют собой количественные оценки соответственно ВУТ, угля и воды.

Были получены средняя концентрация угля этих видов ВУТ, т. е. расчетная концентрация угля; исходная ВУТ и количество угля до испытания со стационарной выдержкой; эквивалентное количество воды этих трех проб ВУТ было рассчитано и сопоставлено с соответствующими значениями после стационарной выдержки (табл. 3.4).



Таблица 3.4

**Сравнительный анализ содержания угольных частиц до и после испытания со стационарной выдержкой по диаграмме рис. 3.10**

| Топливо                                      | Количество воды | Количество угля до испытания | Количество угля после испытания | В–А           |
|--|-----------------|------------------------------|---------------------------------|---------------|
| БУТ, выпущенное в течение трех секунд        | <i>EFJI</i>     | <i>ABFE</i>                  | <i>MNFE</i>                     | – <i>ABNM</i> |
| БУТ, выпущенное от трех секунд до пяти минут | <i>FGKJ</i>     | <i>BCGF</i>                  | <i>OPGF</i>                     | + <i>OPCB</i> |
| Остаток БУТ после пяти минут                 | <i>GHLK</i>     | <i>CDHG</i>                  | <i>QRHG</i>                     | + <i>QRDC</i> |
| Итого  | <i>EHLI</i>     | <i>ADHE</i>                  | <i>ADHE</i>                     |               |

Как видно из таблицы, угольные частицы, представленные *ABNM*, отложились в виде мягкого осадка, как показано *OPCB*, и в виде твердого осадка (*QRDC*) во время стационарной выдержки.

Скорость седиментации ( $D_S$ ) мягкого осадка можно выразить формулой

$$D_S = (OPCB/ADHE)100 \% . \quad (3.22)$$

Скорость седиментации твердого осадка ( $D_H$ ) можно выразить в виде

$$D_H = (QRDC/ADHE)100 \% . \quad (3.23)$$

Скорость общей седиментации ( $D$ ) равна общему количеству за вычетом угольных частиц БУТ, выпущенных в течение 3 с, и может быть выражена в виде

$$D = D_S + D_H \% . \quad (3.24)$$

Значения, полученные в результате деления скорости общей седиментации на время стационарной выдержки ( $T$ ), показывают скорость

отложения угольных частиц в день, т. е. скорость седиментации ( $V$ ), так что эту величину можно использовать как показатель стабильности ВУТ. Далее скорость седиментации ( $V$ ) является показателем стабильности по формуле

$$V = D/T \text{ (\%/день)}. \quad (3.25)$$

### Примеры расчета стационарной стабильности

В табл. 3.5 приведено несколько примеров расчета и использования данных по методике испытания со стационарной выдержкой.

$W_S$  – вес (г) каждой из трех разделенных проб ВУТ;

$W_{\%}$  – процентное содержание по весу (%) каждой пробы ВУТ;

$C$  – процентное содержание угля каждой пробы ВУТ;

$M_A$  – количество угля каждой пробы ВУТ

$$M_A = C \cdot W_{\%} / 100, \quad (3.26)$$

т. е. в течение первых трех секунд ВУТ равняется

$$65,67 \cdot 71,68 / 100 = 47,07 \%. \quad (3.27)$$

Таблица 3.5

### Результаты испытания со стационарной выдержкой

| $W_g$<br>Время<br>выдержки<br>(сутки) | $W_{\%}$<br>Содер-<br>жание<br>по весу,<br>% | $C$<br>Содер-<br>жание<br>по весу,<br>% | $M_A$<br>Концен-<br>трация,<br>% | $H$<br>Количе-<br>ство угля<br>после<br>испыта-<br>ния,<br>% | $M_A$<br>Объем<br>воды,<br>% | $M_B$<br>Содер-<br>жание<br>угля<br>до испы-<br>тания,<br>% | $D_R$<br>Скорость<br>седимен-<br>тации,<br>% |
|---------------------------------------|--|---|----------------------------------|--|------------------------------|---|--|
| 3 с                                   | 491,05                                       | 71,68                                   | 65,67                            | 47,07  | 24,61                        | 54,24   | -7,17  |
| От 3 с<br>до 5 мин                    | 63,09  | 9,21                                    | 72,17                            | 6,65   | 2,56                         | 5,64  | +1,01  |
| +5 мин                                | 130,92                                       | 19,11                                   | 78,87                            | 15,07  | 4,04                         | 8,91  | +6,16  |
| Итого                                 | 685,00                                       | 100,00                                  | —                                | 68,79  | 31,21                        | 68,79   | —  |



В течение второго отрезка времени от трех секунд до пяти минут

$$\text{ВУТ} = 9,21 - 6,65 = 2,56 \text{ \%} . \quad (3.28)$$

В течение пяти минут после этого

$$\text{ВУТ} = 19,11 - 15,07 = 4,04 \text{ \%} . \quad (3.29)$$

$$\text{Итого} = 31,21 \text{ \%} .$$

Из перечисленного выше расчета концентрация угля ( $C_r$ ) образцов ВУТ, испытанных, как показано в табл. 3.5, получается равной 68,79 % ( $= 47,04 + 6,65 + 15,07$ ), а содержание воды ( $H_r$ ) получается 31,24 % ( $= 24,61 + 2,56 + 4,04$ ).

Перед испытанием со стационарной выдержкой каждая из этих трех проб ВУТ имела концентрацию угля 68,79 %, эквивалентную каждому значению содержания воды.

Таким образом, содержание угля в каждой из трех разделенных проб ВУТ, эквивалентное содержанию воды, рассчитывается следующим образом.

$M_B$  – содержание угля каждой из трех проб ВУТ перед испытанием,

$$M_B = (H / (H_r / 100)) - H, \quad (3.30)$$

т. е. в течение первых трех секунд

$$\text{ВУТ} = (24,61 / (31,21/100)) - 24,61 = 54,24 \text{ \%} .$$

Для второго интервала времени от трех секунд до пяти минут

$$\text{ВУТ} = (2,56 / (31,21/100)) - 2,56 = 5,64 \text{ \%} .$$

Для пяти минут после этого

$$\text{ВУТ} = (4,04 / (31,21/100)) - 4,04 = 8,91 \text{ \%} .$$

$$\text{Итого} = 68,79 \text{ \%} .$$



Таким образом, получив разницу концентрации до и после испытания со стационарной выдержкой для каждой из трех проб ВУТ, можно рассчитать скорость седиментации ( $D_r$ ) угля:

$$D_r = M_A - M_B, \quad (3.31)$$

т. е. для первых трех секунд

$$D = 47,07 - 54,24 = - 7,17 \ %;$$

для второго периода от трех секунд до пяти минут

$$D_S = 6,65 - 5,65 = + 1,01 \ %;$$

для последующих пяти минут

$$D_H = 15,07 - 8,90 = + 6,16 \ %.$$

Как видно из результатов испытания со стационарной выдержкой, седиментация угольных частиц составила 1,01 % в виде мягкого осадка и 6,16 % в виде твердого осадка и в целом 7,17 % от относительно нормального ВУТ. Испытание продолжалось в течение 100 дней. Таким образом, скорость отложения угольных частиц в день, т. е. показатель стабильности ( $V$ ), можно выразить в виде

$$V = (D_S + D_H) / \tau \ (\% / \text{день, сутки}). \quad (3.32)$$

Следовательно, по данным табл. 3.5

$$V = 7,17/100 = 0,07 \ (\% / \text{сутки}).$$

## **ГЛАВА 4**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИКЖТ**

#### **4.1. ИССЛЕДОВАНИЕ КРУПНОСТИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ В ИКЖТ**

**К**ак уже указывалось выше (см. гл. 1), крупность частиц твердой фазы существенно влияет на характеристики водоугольного топлива.

Из концепции теории максимально допустимой концентрации твердой фазы следует, что водоугольное суспензионное топливо должно обладать широким диапазоном распределения крупности частиц. Наличие грубодисперсных частиц эффективно повышает концентрацию, но их присутствие служит основным фактором для седиментации во время хранения и для образования механического дожога при сжигании [1]. Такая точка зрения сформировалась при изучении технических характеристик ВУТ, полученных путем традиционных технологий при применении шаровых барабанных и стержневых мельниц.

Субультрадисперсные частицы (1...3 мкм) способствуют стабилизации топливной системы, но большая доля их фракции резко снижает концентрацию твердой фазы. Эти представления хорошо отражены в табл. 4.1, а воздействие крупности угольных частиц заимствовано из [1].

Крупность частиц в ВУТ исследована на ряде практически осуществленных проектов при производстве топлива с использованием ШБМ и стержневых мельниц. Судя по литературным данным [2, 193], размеры частиц в топливе лежат в диапазоне 20...250 мкм с основной фракцией 50...70 мкм.

Крупность ИКЖТ исследовали с целью определения дисперсности твердой фазы при использовании новой технологии производства водоугольного топлива и оценки влияния этого параметра на характеристики ИКЖТ.



Таблица 4.1

**Воздействие крупности угольных частиц**

| Крупность частиц, мкм | Класс                 | Воздействие  | Способы предотвращения воздействия   |
|-----------------------|-----------------------|--|--|
| 150                   | Грубодисперсные       | Основная причина наличия несгоревшего углерода в летучей золе  | Удаление грубодисперсных частиц путем фильтрации   |
| 10                    | Тонкодисперсные       | Основной компонент для сжигания (от 60 до 80 %)  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Выбор оптимальной системы измельчения</li><li>• Выбор наиболее подходящего способа введения и вида добавок для оптимизации количества этих частиц</li><li>• Подбор соответствующей системы удаления золы</li></ul> |
| 1                     | Очень тонкодисперсные | Помогают создавать ВУТ с высокой концентрацией угля  |  |
|                       | Ультратонкодисперсные | Повышают текучесть и стабильность ВУТ, но чрезмерное их количество мешает образованию ВУТ высокой концентрации |  |

Поскольку процесс производства ИКЖТ двухстадийный (производство дисперсного угольного порошка в дезинтеграторе – первая стадия, производство водоугольного топлива в кавитаторе – вторая стадия), исследование твердой фазы последовательно отражало ее изменение в процессе получения топливной композиции.

На первой стадии исследовались дисперсные порошки, получаемые после дезинтегратора. Исследование выполнялось по методике и при применении лабораторного гравиметрического масс-спектрометра Fritsch Particle Sizer «analysett 22».

В качестве испытываемого твердого топлива использовался уголь марки Д Быковского разреза (Сахалин) и уголь марки Д (Кузнецкий бассейн). При исследовании определялись как размеры частиц, так и фракционное их распределение. Кроме того, при исследовании были



задействованы два дезинтегратора, несколько отличавшихся по конструктивному исполнению.

Результаты исследования представлены в таблицах (табл. 4.2 и 4.3) и на графиках.

Таблица 4.2

**Быковский каменный уголь, марка Д-12.  
Результаты анализа угольной пыли однократного (образец № 2)  
и двукратного помола (образец № 3)**

|              | Образец № 2                              | Образец № 3                              | MIC | H, % (№ 2) | H, % (№ 3) |
|--------------|--|--|-----|------------|------------|
| REC NO:      | 369                                      | 366                                      | 1   | 2,7        | 2,6        |
| SAMPLE:      | PR2                                      | PR3                                      | 1,5 | 1,3        | 1,6        |
| $D_p$ (25 %) | 15,6                                     | 10,9                                     | 2   | 1,8        | 2,4        |
| $D_p$ (50 %) | 37,3                                     | 32,2                                     | 3   | 3,1        | 3,9        |
| $D_p$ (75 %) | 64,5                                     | 57,1                                     | 4   | 2,4        | 3,3        |
| SURFACE:     | 7711 (см <sup>2</sup> /см <sup>3</sup> ) | 8532 (см <sup>2</sup> /см <sup>3</sup> ) | 6   | 2,6        | 3,7        |
|              |  |  | 8   | 2,8        | 3,7        |
|              |  |  | 12  | 4,4        | 5,2        |
|              |  |  | 16  | 4,3        | 4,7        |
|              |  |  | 24  | 10,2       | 11,3       |
|              |  |  | 32  | 7,8        | 7,4        |
|              |  |  | 48  | 20,1       | 20,0       |
|              |  |  | 64  | 11,2       | 9,1        |
|              |  |  | 96  | 20,7       | 17,2       |
|              |  |  | 128 | 4,2        | 3,6        |
|              |  |  | 192 | 0,4        | 0,3        |

Гистограмма распределения крупности образца № 2 (однократный помол) показана на рис. 4.1.

Из анализа гистограммы следует, что основная масса частиц располагается в области 35...195 мкм, причем распределение в этой области двухмодальное: максимум первой моды лежит в диапазоне 50...55 мкм, а второй – в диапазоне 90...120 мкм. Это распределение в



общем соответствует оптимальному для получения концентрированной топливной системы, но малая доля частиц менее 20 мкм не способствует устойчивости водоугольной топливной системы на основе такого порошка.

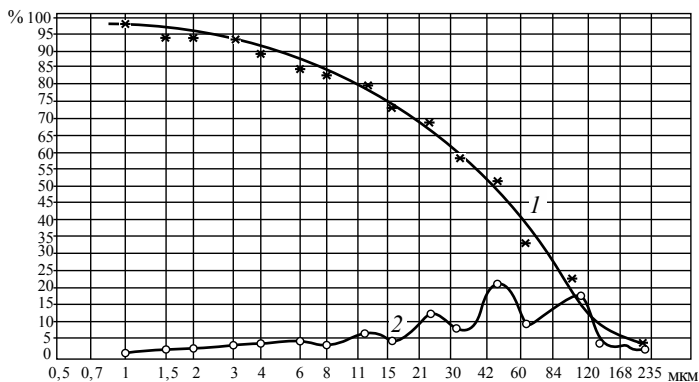


Рис. 4.1. Гистограмма распределения крупности частиц в образце № 2 (размер частиц–процентное содержание):

1 – интегральное распределение; 2 – дифференциальное распределение

Как видно из рис. 4.1, малая доля частиц с ультрадисперсными размерами объясняется наличием предела пластической текучести, который у углей лежит в области 30...35 мкм. Это хорошо заметно на дифференциальной гистограмме.

Ниже приведена таблица результатов исследования проб угольной пыли угля марки Д-12 однократного и двукратного помола.

Таблица 4.3

#### Результаты исследования проб угольной пыли угля Д-12

| № п/п | Наименование пробы              | Влага аналитическая $W^a$ , % | Зола $A$ , % |       | Выход летучих, % |           |
|-------|---------------------------------|-------------------------------|--------------|-------|------------------|-----------|
|       |                                 |                               | $A^a$        | $A^d$ | $V^a$            | $V^{daf}$ |
| 1     | Образец № 2 (однократный помол) | 8,2                           | 21,4         | 23,3  | 33,9             | 48,2      |
| 2     | Образец № 3 (двукратный помол)  | 5,3                           | 26,2         | 27,7  | 32,8             | 47,9      |

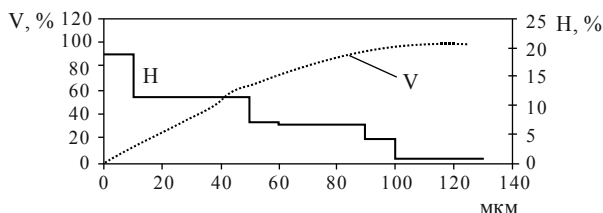


Результаты исследования представлены также в табл. 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4

**Результаты исследования гранулометрического состава угольного порошка однократного помола (образец № 2)**

|              |                |               |        |             |
|--------------|----------------|---------------|--------|-------------|
| REC. NO: 369 |                | OPERATOR      | : ENG  |             |
| SAMPLE       | : PR 2         | SIEVE         | : PASS |             |
| MEDIUM       | : H20 + D – 7X | OVER 192M (%) | : 0    |             |
| DISPERSION   | : US           | OPTIONAL SIZE | : NO   | - Average - |
| DATE         | : 2002/03/26   | REMARKS       | : 9    | 37,3 мкм    |



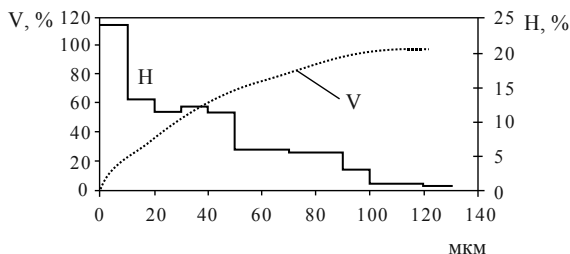
| мкм     | V, %     | H, % | S, %    | P, %    |
|---------|----------|------|---------|---------|
| 1,0     | 2,7      | 2,7  | 42,0    | 81,9    |
| 1,5     | 4,0      | 1,3  | 50,1    | 88,2    |
| 2,0     | 5,8      | 1,8  | 58,1    | 92,6    |
| 3,0     | 8,9      | 3,1  | 67,8    | 96,4    |
| 4,0     | 11,3     | 2,4  | 73,1    | 97,9    |
| 6,0     | 13,9     | 2,6  | 77,1    | 98,6    |
| 8,0     | 16,7     | 2,8  | 80,3    | 99,1    |
| 12,0    | 21,1     | 4,4  | 83,7    | 99,4    |
| 16,0    | 25,4     | 4,3  | 86,1    | 99,6    |
| 24,0    | 35,6     | 10,2 | 90,0    | 99,8    |
| 32,0    | 43,4     | 7,8  | 92,2    | 99,9    |
| 48,0    | 63,5     | 20,1 | 96,1    | 99,9    |
| 64,0    | 74,7     | 11,2 | 97,7    | 100,0   |
| 96,0    | 95,4     | 20,7 | 99,7    | 100,0   |
| 128,0   | 99,6     | 4,2  | 100,0   | 100,0   |
| 192,0   | 100,0    | 0,4  | 100,0   | 100,0   |
| AVERAGE | 37,3 мкм |      | 1,5 мкм | 0,6 мкм |



Таблица 4.5

**Результаты исследования гранулометрического состава угольного порошка двукратного помола (образец № 3)**

SAMPLE : PR 3 OPERATOR : ENG  
MEDIUM : H2O + D – 7X SIEVE : PASS  
DISPERSION : US OVER 192M (%) : 0  
DATE : 2002/03/26 OPTIONAL SIZE : NO - Average -  
REMARKS : 9 32,2 мкм



| МКМ     | V, %     | H, % | S, %    | P, %    |
|---------|----------|------|---------|---------|
| 1,0     | 2,6      | 2,6  | 36,6    | 77,3    |
| 1,5     | 4,2      | 1,6  | 45,6    | 84,9    |
| 2,0     | 6,6      | 2,4  | 55,2    | 90,7    |
| 3,0     | 10,5     | 3,9  | 66,2    | 95,4    |
| 4,0     | 13,8     | 3,3  | 72,8    | 97,4    |
| 6,0     | 17,5     | 3,7  | 78,0    | 98,5    |
| 8,0     | 21,2     | 3,7  | 81,7    | 99,0    |
| 12,0    | 26,4     | 5,2  | 85,4    | 99,4    |
| 16,0    | 31,1     | 4,7  | 87,8    | 99,6    |
| 24,0    | 42,4     | 11,3 | 91,7    | 99,8    |
| 32,0    | 49,8     | 7,4  | 93,6    | 99,9    |
| 48,0    | 69,8     | 20,0 | 97,1    | 100,0   |
| 64,0    | 78,9     | 9,1  | 98,2    | 100,0   |
| 96,0    | 96,1     | 17,2 | 99,8    | 100,0   |
| 128,0   | 99,7     | 3,6  | 100,0   | 100,0   |
| 192,0   | 100,0    | 0,3  | 100,0   | 100,0   |
| AVERAGE | 32,2 мкм |      | 1,7 мкм | 0,6 мкм |



Анализ результатов показывает, что вопреки распространенному мнению о потере летучих при размоле топлива дисперсные угольные частицы даже при размоле в дезинтеграторе сохраняют в себе практически все летучие. Вместе с тем повторный помол несущественно изменяет дисперсность угольного порошка; суммарная поверхность частиц увеличивается на 10 %, на 0,3...0,6 % уменьшается содержание летучих, несколько меняется распределение крупности частиц. Особенно информативен рис. 4.2, в котором приведены гистограммы однократного и двукратного помола угля марки Д-12 Быковского разреза (Сахалин).

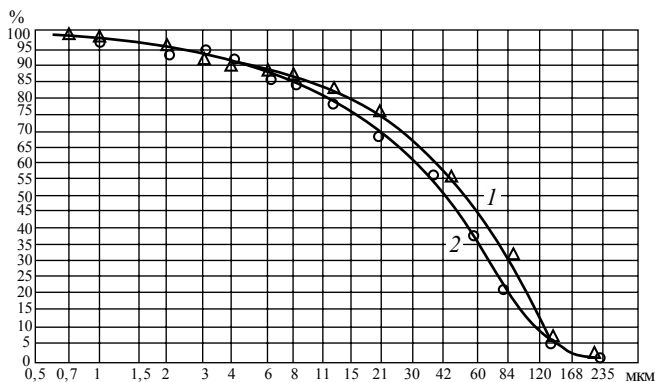


Рис. 4.2. Гистограмма распределения крупности угольного порошка марки Д-12 после дезинтегратора:

1 – однократный помол; 2 – двукратный помол

Из рисунка следует, что размеры частиц при повторном помоле уменьшаются в области 10...100 мкм, особенно в диапазоне 30...90 мкм, и практически никаких изменений не происходит в области очень тонкодисперсной фракции, согласно терминологии табл. 4.1.

Усовершенствование конструкции дезинтегратора отражается на дисперсности помола, несколько увеличивается тонкодисперсная фракция, однако полного преодоления барьера пластической текучести угольного порошка не происходит [128].

Новая конструкция дезинтегратора имела уменьшенные зазоры между роторами и дисками и тщательно выверенные оси расположения пальцев в соответствии с геометрией движения частиц при соударениях с пальцами при заданной частоте вращения, а также при прохождении частицы через рабочую зону дезинтегратора. В качестве испытываемого был кузнецкий уголь марки Д. В табл. 4.6 представлены



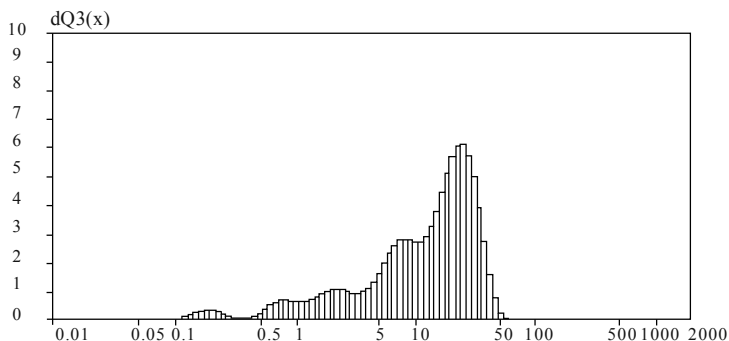


результаты исследования дисперсности угольного порошка после модифицированного дезинтегратора.

Таблица 4.6 (часть 1)

**Fritsch Particle Sizer 'analysette 22'**

|  |                                |            |             |
|--|--------------------------------|------------|-------------|
| Meas.No. 38   Date 05.03.2008   Time 10:14   Operator Mutter   ID 7645   Serial No. 123456 |                                |            |             |
| AGY-1<br>6.03.08<br>22.2000/00841  |                                |            |             |
| Measuring Range  | 0.1 [µm] - 1022.24 [µm]        | Pump       | 60 [%]      |
| Resolution   | 108 Channels (20 mm / 385 mm ) | Ultrasonic | On          |
| Absorption   | 8.00 [%]                       |            |             |
| Measurement Duration   | 200 [Scans]                    |            |             |
| Regularization / Modell o_medium   |                                |            |             |
| Mie Theorie  |                                |            |             |
|  | Carbon (black)                 |            |             |
|  | Refractive Index               | n = 1.800  |             |
|  | Absorption Coefficient         | a = 0.500  |             |
|  | Water (20°C)                   |            |             |
|  | Refractive Index               | n = 1.3328 |             |
| d[4,3] = 16.11µm   Arithmetic Mean = 16.107 µm   Specific Surface Area = 18977.53 cm²/cm³  |                                |            |             |
| Elongation ratio of the D50 (15.013 micron) value from last measurement...                 |                                |            |             |
| Elongation = 1.80   Min Elongation = 0.00   Max. Elongation = 0.00   Standard Dev. = 0.000 |                                |            |             |
| Interpolation Values... C:\Program Files\sta22_32\fritsch\HIMNT_1.FPS                      |                                |            |             |
| ***** % <=   | 0.010 µm                       | 0.0 % <=   | 0.100 µm    |
| 11.7 % <=  | 2.000 µm                       | 15.7 % <=  | 3.000 µm    |
| 21.2 % <=  | 5.000 µm                       | 24.7 % <=  | 6.000 µm    |
| 32.0 % <=  | 8.000 µm                       | 35.2 % <=  | 9.000 µm    |
| 63.0 % <=  | 20.000 µm                      | 86.4 % <=  | 30.000 µm   |
| 69.7 % <=  | 50.000 µm                      | 100.0 % <= | 100.000 µm  |
| 100.0 % <=   | 300.000 µm                     | 100.0 % <= | 400.000 µm  |
| 100.0 % <=   | 600.000 µm                     | 100.0 % <= | 700.000 µm  |
| 100.0 % <=   | 900.000 µm                     | 100.0 % <= | 1000.000 µm |
| Interpolation Values... C:\Program Files\sta22_32\fritsch\10_90.FPV                        |                                |            |             |
| 10.0 % <=  | 1.672 µm                       | 20.0 % <=  | 4.595 µm    |
| 40.0 % <=  | 10.743 µm                      | 50.0 % <=  | 15.013 µm   |
| 70.0 % <=  | 22.592 µm                      | 80.0 % <=  | 25.619 µm   |
| 100.0 % <=   | 72.725 µm                      | 90.0 % <=  | 32.189 µm   |





В рамках табл. 4.6 дано дифференциальное распределение крупности порошка, из чего следует, что модифицированный дезинтегратор позволяет получить более тонкий помол, доля очень тонкодисперсных частиц возрастает до 30 %, значительно возрастает удельная поверхность порошка, которая в этом случае составляет  $18\,977\text{ см}^2/\text{см}^3$ . Но вместе с тем барьер агрегатирования частиц не преодолен полностью, несмотря на то что в дезинтеграторе создаются идеальные условия для разъединения частиц после диспергирования.

Т а б л и ц а 4.6 (часть 2)

**Fritsch Particle Sizer 'analysette 22'**

| Mean  | Values  |       |        |       |        |       |         |
|-------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|
| D43 = | 16 09µm | D42 = | 7 13µm | D41 = | 2 56µm | D40 = | 1 31 µm |
| D33 = | 3 16µm  | D31 = | 1 02µm | D30 = | 57 µm  |       |         |
| D21 = | 33 µm   | D20 = | 24µm   |       |        |       |         |
| D10 = | 1 67µm  |       |        |       |        |       |         |

|                                |                                  |                          |            |
|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------|
| Statistical Means              |                                  |                          |            |
| Arithmetic Mean Diameter       | 16 094µm                         | Variance                 | 135 514µm? |
| Geometric Mean Diameter        | 10 136µm                         | Mean Square Deviation    | 11 641 µm  |
| Quadratic Square Mean Diameter | 19 829µm                         | Average Deviation        | 9 793µm    |
| Harmonic Mean Diameter         | 3 158µm                          | Coefficient of Variation | 72 332 %   |
| Statistical Modes              |                                  |                          |            |
| Skewness                       | 491                              | Mode                     | 23 046µm   |
| Curtosis                       | - 572                            | Median                   | 15 006µm   |
| Span                           | 2 031                            | Mean/Median Ratio        | 1 072      |
| Uniformity                     | 65                               |                          |            |
| Specific Surface Area          | 19000 75                         |                          |            |
|                                | cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> |                          |            |
| Density                        | 1 g/cc                           |                          |            |
| Form Factor                    | 1 g/cc                           |                          |            |

Ниже на рис. 4.3 приведены для сравнения гистограммы интегрального распределения частиц в угольном порошке по данным лабораторного исследования с применением методики и аппарата Fritsch Particle Sizer «analysette 22».

Анализ рис. 4.3 свидетельствует о значительном уменьшении тонины помола в модифицированном дезинтеграторе, но вместе с тем и о том, что значительная часть угольного порошка лежит в области тонкодисперсных частиц 30...50 мкм и, по-видимому, при использовании только механических средств диспергирования получить более тонкой структуры топлива не удается [133, 188, 157].

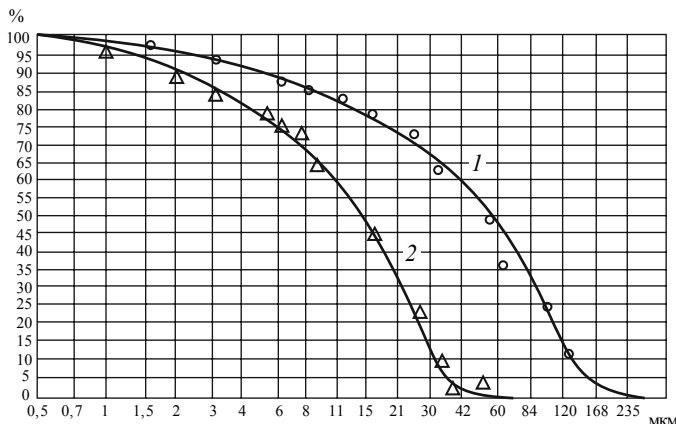


Рис. 4.3. Гранулометрический анализ угольного порошка после дезинтегратора:

1 – старая модель дезинтегратора, двойной помол; 2 – модифицированная модель дезинтегратора, одинарный помол

Для достижения высокодисперсной и высокоомогенизированной структуры необходимо дополнительное диспергирование, использующее разъединяющую дисперснонесущую среду (жидкость) и мощное воздействие на твердые частицы гидроударного и термического характера. Такое воздействие возможно получить в кавитационном поле при коллапсе кавитационных пузырьков [98, 164, 181, 196], причем, учитывая размеры и продолжительность локальных пузырьковых процессов при коллапсе, можно утверждать, что энергетическая мощность этих процессов вполне достаточна для разъединения дефектных активированных частиц топлива и для разрыва межмолекулярных связей в кластерах воды [194, 195, 197, 180]. Технологически – это вторая стадия приготовления ИКЖТ, осуществляемая в кавитаторе.

Исследование дисперсности твердой фазы в ИКЖТ выполнено было после обработки водоугольного топлива в кавитаторе. Для целей исследования использовалась одна из самых лучших моделей кавитатора: в модели достигалась высокая плотность (энергетическая и объемная) кавитационного поля, что позволяло производить обработку за 10 мин при циркуляции обрабатываемой среды через циркуляционную емкость. При этом предварительно активированные в дезинтеграторе частицы угля соединялись с предварительно активированной водой и



перемешивались в скоростном миксере, после чего водотопливная система поступала на кавитационную обработку [98, 115].

При исследовании крупности и распределения твердых частиц в ИКЖТ были применены два метода: микроскопирование и исследование при применении фотометрического седиментометра ФСХ-5 по методике ИГИ.

На начальной стадии исследования применялось микроскопирование с подачей изображения при помощи электронной приставки на экран компьютера. Микроскоп имел большую разрешающую способность, а в компьютере была заложена программа, позволяющая анализировать размеры частиц и их распределение на основе картинки в поле зрения микроскопа. Этот метод широко применяется при исследовании дисперсности ВУТ.

Образцы фотографий с экрана компьютера показаны на рис. 4.4 и 4.5. Из анализа этих рисунков следует, что размеры угольных частиц составляют в основном менее 3 микрон, но встречаются частицы и до 6...7 микрон, которые представляют собой агломерации более мелких частиц. Однако представляется, что метод анализа с применением микроскопа дает завышенные размеры частиц в топливной системе: в водоугольной системе твердые частицы разъединены жидкой средой, агрегатирование возникает при помещении топливной системы под микроскоп.

В Институте горючих ископаемых (ИГИ) был выполнен гранулометрический анализ водоугольных суспензий, позволяющий адекватно определить дисперсность и распределение твердой фазы в водоугольном топливе.

Образцы ИКЖТ были исследованы в ИГИ с применением фотометрического седиментометра ФСХ-5. Образец ВУС-Б содержал 64 % твердой фазы по массе, а ВУС-4 – 55 %. Результаты гранулометрического анализа ИКЖТ представлены в приложении.

Первый и безусловный вывод, который можно сделать из анализа этих результатов: ИКЖТ, приготовленное по новой технологии, является монодисперсной топливной системой, поскольку диапазон изменения крупности твердой фазы лежит в очень узком интервале 0...2 мкм. Монодисперсность топлива сама по себе является положительным фактором, улучшающим процесс сжигания топлива, уменьшающим выход золы, так как увеличивается контракция золы (угар минеральной части) при сгорании.

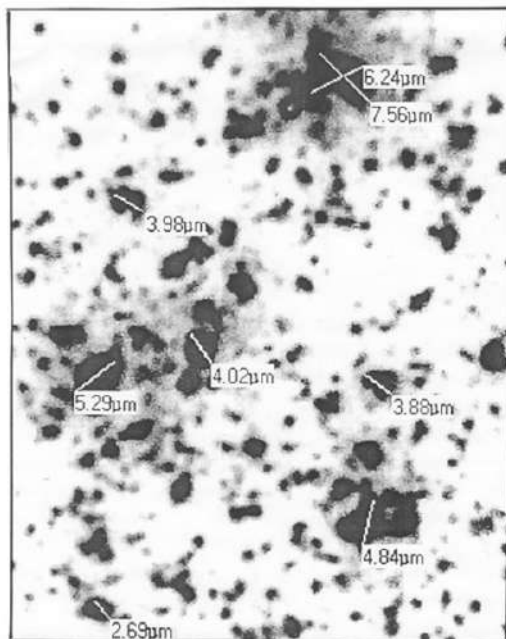


Рис. 4.4. Твердая фаза и ИКЖТ под микроскопом. Образец № 6 (увеличение 3500 раз)

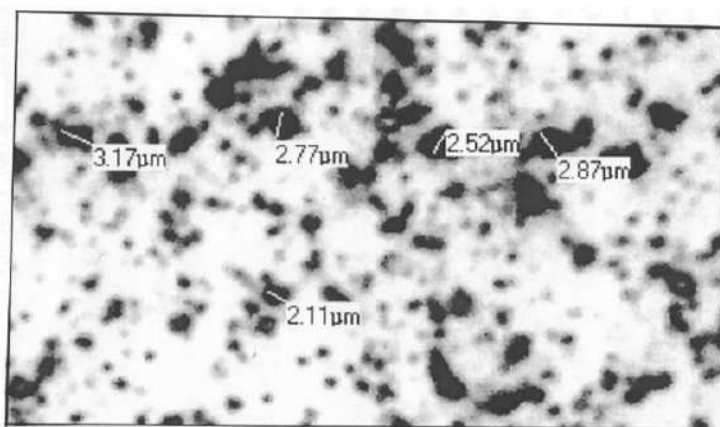


Рис. 4.5. Твердая фаза в ИКЖТ под микроскопом. Образец № 7 (увеличение 3500 раз)



Анализ монодисперсного ИКЖТ отражен на диаграммах (рис. 4.6 и 4.7).

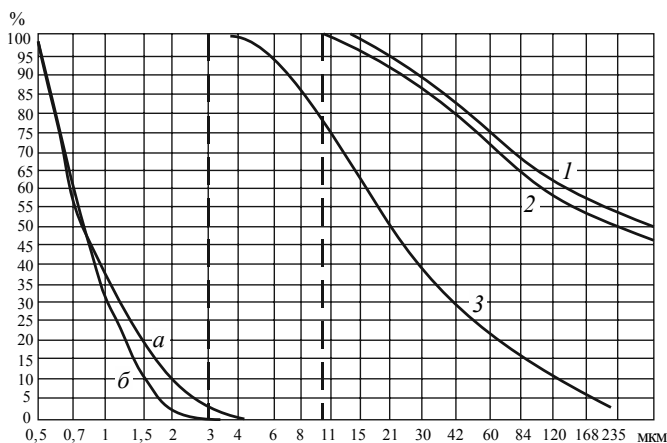


Рис. 4.6. Численное интегральное распределение твердой фазы в водоугольных топливах:

*a* – ИКЖТ Б; *б* – ИКЖТ 4; 1 – гранулометрический состав ВУС на «Блэк Меса» (США), 2 – гранулометрический состав ВУС в ТЭЦ-5 (Новосибирск), 3 – гранулометрический состав улучшенной лабораторной ВУС

Из рис. 4.6 следует, что если обычные традиционные ВУС для электростанций относятся к тонкодисперсным топливам, то ИКЖТ – субультрадисперсное топливо с размерами частиц 0...3 мкм. Учитывая монодисперсный характер этого топлива, можно утверждать, что топливо скорее является коллоидным, а не ВУТ.

Еще более заметно различие между ВУС-ВУТ и ИКЖТ из рис. 4.7 и 4.8. Области существования ВУС-ВУТ и ИКЖТ по размерам частиц различаются практически на два порядка, что делает эти топлива принципиально различными. Те технологические и технические решения, которые выработаны для использования ВУС и ВУТ, могут быть неактуальны для ИКЖТ, да и сама ориентация объектов топливозамещения может оказаться при более глубокой проработке иной, чем для ВУС и ВУТ.

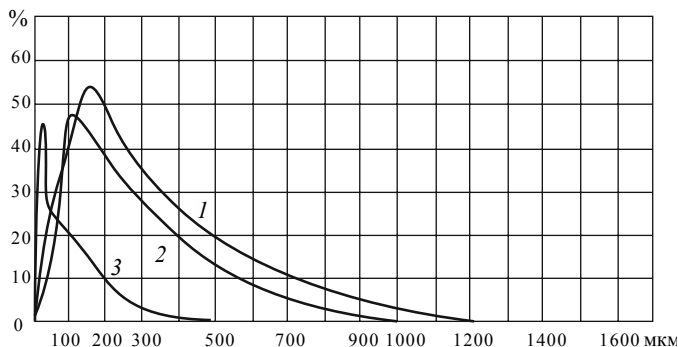


Рис. 4.7 Дифференциальное распределение крупности твердой фазы в ВУТ:

1 – электростанции «Блэк Меса» (США), 2 – электростанции ТЭЦ-5 (Новосибирск), 3 – улучшенного качества двустадийной переработки

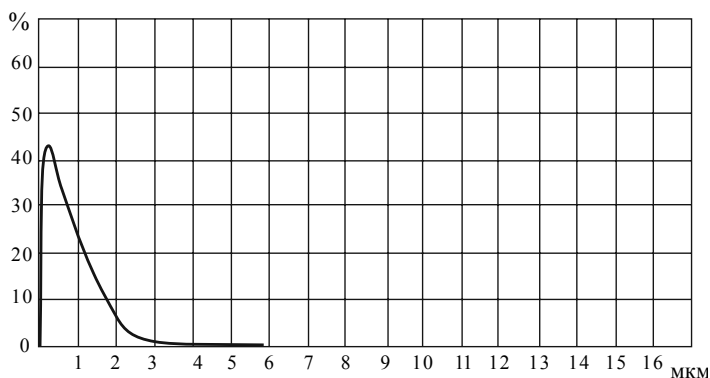


Рис. 4.8. Дифференциальное распределение крупности твердой фазы в ИКЖТ

На рис. 4.9 представлено дифференциальное распределение крупности водоугольного топлива различных источников производства. Этот рисунок подчеркивает различие в характеристиках твердой фазы в водоугольных топливах традиционной технологии и ИКЖТ, приготовленного по новой технологии.

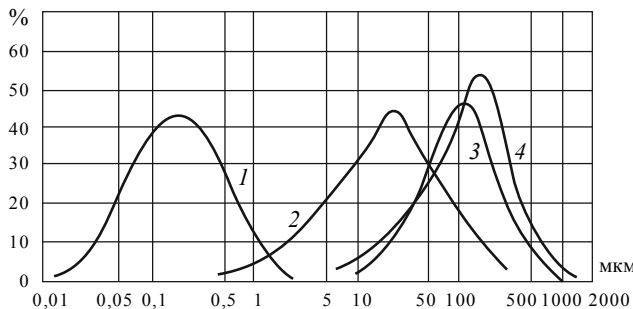


Рис. 4.9 Дифференциальное распределение крупности твердой фазы:

1 – ИКЖТ; 2 – улучшенный ВУС двукратной переработки;  
3 – ВУС Новосибирской ТЭЦ-5; 4 – ВУС электростанции  
«Блэк Меса» (США)

Резюмируя сказанное выше, отметим следующее.

1. ИКЖТ является монодисперсным топливом в отличие от ВУС и ВУТ.

2. Крупность ИКЖТ на два порядка отличается от крупности частиц в традиционном ВУТ. Между ИКЖТ и водоугольным топливом ВУС-ВУТ существует значительный разрыв в такой характеристике, как дисперсность. ИКЖТ скорее является коллоидным топливом, чем суспензией.

3. Эти показатели определяют различие в характеристиках ИКЖТ, его возможностях и особенностях. Все это требует углубленного изучения.

## 4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИКЖТ

### 4.2.1. ОБЩЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Целью выполненного экспериментального исследования было определение качественных реологических характеристик топлива.

ИКЖТ для эксперимента было получено в образце объемом около 20 литров путем диспергирования торфа, штыба и сырой средней нефти с помощью диспергатора-кавитатора.





#### Состав исследуемого ИКЖТ (массовые доли)

Антрацитовый штыб (порошок после дезинтегратора) .....  $m_y = 0,50$

Торфяной гель, полученный путем кавитации торфа

Толмачёвского месторождения, окисленный, глубокого

разложения .....  $m_T =$

0,30

$m = 0,12$

Вода .....  $m_H = 0,08$

Сырая нефть

Плотность ИКЖТ была  $1050 \dots 1100 \text{ кг/м}^3$ .

#### 4.2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ВИСКОЗИМЕТРА РОТАЦИОННОГО ТИПА СИСТЕМЫ П.П. ВОЛОРОВИЧА

##### Описание установки

Для проведения исследования используется ротационный вискозиметр типа РВ-8 [198]. Он состоит из следующих элементов (рис. 4.10): внутреннего вращающегося цилиндра 1, погруженного во внешний неподвижный цилиндр 2. Внешний цилиндр съемный и закреплен на штыковом затворе 3. Система цилиндров может передвигаться в вертикальном направлении по колонке 13.

В крайнем нижнем положении система цилиндров погружается в термостат, в который налита термостатирующая жидкость 12. Назначение термостата – длительно поддерживать требуемую температуру между цилиндрами 2 и 3, куда заливается жидкость, коэффициент вязкости которой необходимо определить.

Температура испытываемой жидкости измеряется при помощи трех медноконстантановых термопар 4, подсоединенных к милливольтметру. Холодные спаи термопар погружены в сосуд Дюара, термостатированный при  $0^\circ\text{C}$ .

Для вращения внутреннего цилиндра через блоки 5 на нитях перекинуты грузы  $P$ , вращающие шкив 7, посаженный на ось 8. Для определения положения цилиндра имеется круг с делениями 10 и стрелка, посаженная на ось 8. Грузы поддерживаются в приподнятом положении при начале испытания.

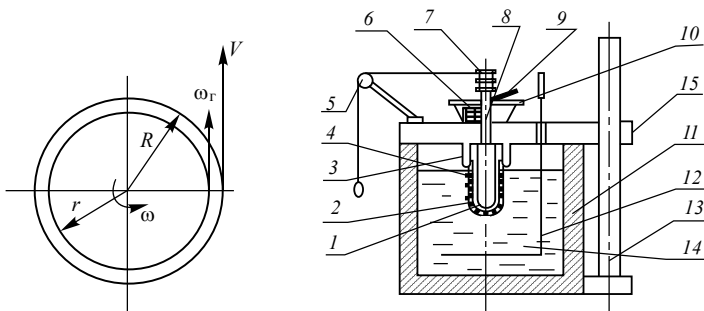


Рис. 4.10. Прибор Волоровича

В приборе Волоровича внутренний цилиндр приводится во вращение с помощью грузов, подвешенных на нитях, намотанных на барабан радиусом  $R_0$  (рис. 4.10).

Тогда момент, вращающий внутренний цилиндр, найдется из выражения

$$M_B = (P - P_0)R_0,$$

где  $P$  – суммарный вес грузов;  $P_0$  – вес грузов, необходимый для преодоления трения в подшипниках установки. Динамический коэффициент вязкости определяется из выражения

$$\eta \frac{\omega r^2}{R - r} S = \eta \frac{2\pi n r^2}{R - r} S = (P - P_0)R_0, \quad (4.1)$$

здесь  $n$  – скорость вращения внутреннего цилиндра, об/с;  $\omega = 2\pi n$ ;  $S$  – площадь цилиндра, смоченная жидкостью.

Таким образом,

$$\eta = \frac{P - P_0}{n} \frac{R_0(R - r)}{2\pi r^2 S} = \frac{P - P_0}{n} K,$$

где  $K = \frac{R_0(R - r)}{2\pi r^2 S}$  – коэффициент, включающий постоянные величины и величину  $S$ , зависящую от уровня жидкости, налитой между цилиндрами.



В коэффициент  $K$  вносится поправка на трение в полусфере в торцевой части цилиндра, которая в выкладках для простоты не учитывалась, но учтена нелинейность распределения скоростей в зазоре. Окончательно  $K$  устанавливается в виде графика при юстировке прибора. На рис. 4.11 представлена паспортная зависимость  $K$  от высоты погружения цилиндра в испытываемую жидкость  $h$ .

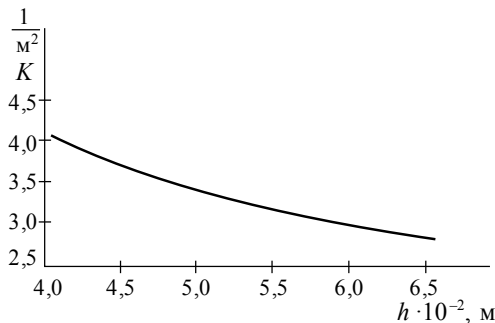


Рис. 4.11. Паспортная зависимость  $K = f(h)$

График рис. 4.11 соответствует выражению

$$K = \frac{14760}{68300h + 793}, \quad (4.2)$$

где  $h$  – глубина погружения цилиндра, м.

### Методика проведения эксперимента

В эксперименте определялась зависимость вязкости ИКЖТ от температуры. Для определения верхнего предела температуры, при которой находится вязкость, 50 см<sup>3</sup> ИКЖТ в фарфоровом тигле в песочной бане нагревали от 20 °С и выше со скоростью 2 °С/мин. В момент начала газовыделения (парообразования) фиксировалась температура верхнего предела.

Для определения нижнего предела температуры 100 см<sup>3</sup> ИКЖТ в стеклянном стакане помещали в термостат, охлаждаемый керосином, с температурой до –20 °С. В ИКЖТ погружалась стеклянная палочка, по потере подвижности которой определялась нижняя температура для определения вязкости.



В полученном диапазоне температур выбраны четыре характерные точки, в которых определялось значение вязкости.

Определение вязкости производилось в соответствии с методикой проведения экспериментов и их расчета, изложенной в паспорте прибора. Размерность динамической вязкости  $\mu$ , П (пуаз).

Оценка погрешностей была выполнена в соответствии с правилами измерения величин и вычисления функций. Относительные погрешности измерений составили:

- для массы  $\gamma_m = 0,02$  ;
- для времени  $\gamma_\tau = 0,005$  ;
- для угловых величин  $\gamma = 0,0005$  ;
- для высоты  $h$  (линейный размер)  $\gamma_n = 0,017$ .

Принято, что распределение случайных погрешностей во всех проведенных измерениях носит симметричный характер. Случайная погрешность определения динамического коэффициента вязкости составляет

$$\gamma_\mu = \left( \gamma_h^2 + \gamma_m^2 + \gamma_\pi^2 + \gamma_\phi^2 \right)^{0,5} = 0,027 . \quad (4.3)$$

В ходе подготовки эксперимента установлено, что для исследуемого состава ИКЖТ:

- верхним пределом температуры следует принять  $t_b = 76^\circ\text{C}$ , при которой начинается газовыделение из ИКЖТ (кипение легких торфяных фракций);
- при снижении температуры ниже  $0^\circ\text{C}$  происходит образование эвтектики, идет кристаллизация части воды в виде мелких ( $< 0,5$  мм) кристалликов льда, слабо связанных в единую, равномерную, слоистую структуру, при незначительном механическом воздействии на которую она разлетается, и топливо вновь обретает жидкостные свойства;
- нижний предел температуры  $t_n = -12^\circ\text{C}$  соответствует полному прекращению текучести топлива.

### **Результаты эксперимента и их анализ**

Результаты экспериментов представлены в табл. 4.7.



Таблица 4.7

## Результаты эксперимента по определению вязкости

| $t, ^\circ\text{C}$ | $m, \text{г}$ | $\tau, \text{с}$ | $\mu, \text{П}$ | $D, \text{с}^{-1}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $m, \text{г}$ | $\tau, \text{с}$ | $\mu, \text{П}$ | $D, \text{с}^{-1}$ |
|---------------------|---------------|------------------|-----------------|--------------------|---------------------|---------------|------------------|-----------------|--------------------|
| –5                  | 3,50          | 31,3             | 5,4             | 62,35              | 45                  | 4,5           | 42,5             | 9,4             | 45,92              |
|                     |               | 32,5             | 5,6             | 60,04              |                     |               | 38,2             | 8,5             | 51,08              |
|                     |               | 30,3             | 5,2             | 64,04              |                     |               | 47,2             | 10,5            | 41,34              |
|                     | 2,50          | 37,5             | 4,6             | 52,04              |                     | 3,5           | 37,0             | 6,4             | 52                 |
|                     |               | 30,8             | 3,8             | 63,36              |                     |               | 42,5             | 7,3             | 45,92              |
|                     |               | 31,0             | 3,8             | 62,95              |                     |               | 32,0             | 5,5             | 60,98              |
|                     | 1,50          | 32,7             | 2,4             | 59,68              |                     | 2,5           | 38,1             | 4,7             | 51,22              |
|                     |               | 27,7             | 2,0             | 70,45              |                     |               | 35,0             | 4,3             | 55,60              |
|                     |               | 30,4             | 2,2             | 64,19              |                     |               | 45,5             | 5,6             | 42,89              |
|                     | 1,06          | —                | —               | —                  |                     | 1,61          | —                | —               | —                  |
| 15                  | 5,5           | 48,3             | 13,1            | 40,00              | 70                  | 3,5           | 38,4             | 6,6             | 50,82              |
|                     |               | 41,8             | 11,3            | 46,68              |                     |               | 33,2             | 5,7             | 58,78              |
|                     |               | 43,4             | 11,8            | 44,96              |                     |               | 35,6             | 6,2             | 54,82              |
|                     | 4,5           | 47,7             | 10,6            | 40,91              |                     | 2,5           | 35,7             | 4,4             | 54,66              |
|                     |               | 43,6             | 9,7             | 44,76              |                     |               | 35,6             | 4,4             | 54,82              |
|                     |               | 41,0             | 9,1             | 47,60              |                     |               | 36,7             | 4,5             | 53,17              |
|                     | 3,5           | 56,0             | 9,7             | 34,85              |                     | 1,5           | 32,7             | 2,4             | 59,68              |
|                     |               | 47,6             | 8,2             | 41,00              |                     |               | 37,3             | 2,8             | 52,32              |
|                     |               | 49,0             | 8,5             | 39,82              |                     |               | 34,6             | 2,6             | 56,40              |
|                     | 2,66          | —                | —               | —                  |                     | 1,28          | —                | —               | —                  |

Результаты эксперимента представлены в графической интерпретации на рис. 4.12.

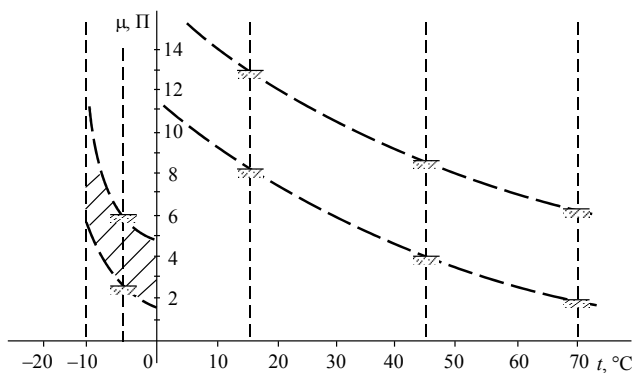


Рис. 4.12. Графическая интерпретация результатов эксперимента

Таким образом, можно сказать следующее.

1. В отличие от ньютоновской жидкости, у которой зависимость вязкости от температуры выражена однозначно, исследуемая топливная система ИКЖТ в эксперименте по определению вязкости продемонстрировала несходимость результатов измерений при повторении опытов в серии. Это показано на рис. 4.12 в виде поля, в пределах которого лежит разброс точек.

Единственным определяющим предположением в методике эксперимента с вискозиметром РВ-8 является распределение скорости в зазоре между цилиндрами. Следовательно, объяснить результаты эксперимента можно следующим образом. ИКЖТ является структурированной вязкопластичной жидкостью и образует в зазоре неподвижного вискозиметра тиксотропную структуру. В момент приведения в движение внутреннего цилиндра структура разрушается произвольным образом, образуя новый измерительный зазор произвольной формы и толщины со стенками из ИКЖТ, сохранившего тиксотропную структуру. Анализ табл. 4.7 не выявляет также зависимости скорости вращения внутреннего цилиндра от приложенного к нему крутящего момента. Таким образом, ИКЖТ обладает сильно выраженным свойством дилатантности – способности вещества оказывать тем более сильное сопротивление (реакцию), чем сильнее над ним внешнее воздействие.



Исходя из сказанного выше, можно с большой вероятностью предположить, что реологические характеристики ИКЖТ описываются моделью Гершеля–Баркли (см. главу 1):

$$\tau = m\gamma^n + \tau_y,$$

где  $n > 1$ , а не моделью Бингама–Шведова, как это представляется в [2].

2. На графике вязкостно-температурной характеристики выделяют две зоны, явно связанные с различным агрегатным состоянием свободной влаги в выделенном диапазоне температур. Можно предположить, что резкое уменьшение вязкости ИКЖТ в области отрицательных температур (области эвтектики) объясняется наличием в топливе крупинок льда, которые, действуя подобно шарикам в подшипниках качения, уменьшают вязкостное трение скольжения.

#### 4.2.3. ТИКСОТРОПНОЕ СОСТОЯНИЕ ИКЖТ

В тиксотропном состоянии ИКЖТ сложные связи между твердой и жидкой фазой практически законсервированы. Структура тиксотропной жидкости сохраняется неизменной вплоть до момента, когда внешнее воздействие разрушит тиксотропные связи и возвратит эту жидкость в лабильное состояние. Таким воздействием может быть встряхивание, размешивание мешалкой или побудительная струя такой же, но жидкотекучей жидкости из насоса и т. п.

Существует широко распространенное мнение [2], что практически все виды ВУС, ВУТ, ИКЖТ с содержанием твердой фазы менее 0,45...0,5 по массе могут рассматриваться как ньютоновские жидкости и не образуют тиксотропных состояний. Однако, как показал наш опыт, и они могут переходить в тиксотропное состояние, если в их составе есть органические добавки (масла, мазут, нефть и т. п.)

Тиксотропное состояние искусственных композиционных жидких топлив имеет очень важное значение для длительного хранения топлив, транспортировки их на большие расстояния. Известно, что переход к тиксотропному состоянию для каждого вида топлива наступает при увеличении содержания твердой фазы выше некоторого критического значения  $\Phi_{кр}$ . Типичная зависимость  $\tau = f(\Phi_{кр})$  показана на рис. 4.13.



Однако если следовать анализу эксперимента, приведенного выше, переход от жидкотекучей системы совершается через некоторую переходную область относительно значений  $\tau_{кр}$  и  $\Phi_{кр}$ .

Были проведены эксперименты для ИКЖТ с различными углями в качестве твердой фазы и без каких-либо органических добавок, присадок, дисперсантов, в ходе которых были получены значения  $\Phi_{кр}$ :

- для горловского антрацита марки АР  $\Phi_{кр} \sim 0,65$ ;
- для кузнецкого каменного угля марки ССР  $\Phi_{кр} \sim 0,55$ ;
- для ирша-бородинского бурого угля Б2Р  $\Phi_{кр} \sim 0,45$ .

Графически результаты могут быть представлены в виде рис. 4.14.

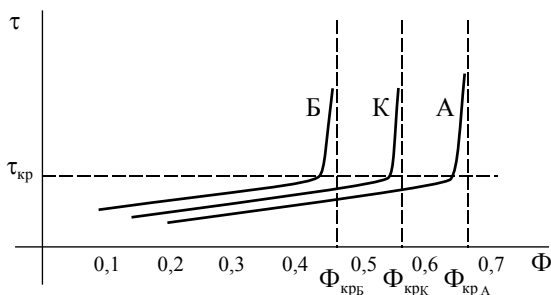


Рис. 4.14. Переход к тиксотропному состоянию для топливных систем на основе:

А – антрацита; К – каменного угля; Б – бурого угля

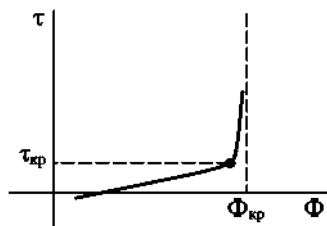


Рис. 4.13. Зависимость напряжения сдвига  $\tau$  от содержания твердой фазы  $\Phi$ :

$\tau_{кр}$  – критическое значение напряжения сдвига (переход к тиксотропной системе);

$\Phi = \frac{M_{тв}}{M_{ИКЖТ}}$  – массовая доля твердой фазы в ИКЖТ

Известно также из описаний различных типов деминерализованных ВУТ [1, 2, 199], что углубление деминерализации топлива отодвигает величину  $\Phi_{кр}$  в сторону больших значений (до 0,75...0,8).





#### 4.2.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ ИКЖТ КАК НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ

Выше было установлено, что ИКЖТ с органическими добавками относится к неньютоновским жидкостям с выраженными дилатантными свойствами. В связи с этим реологические свойства жидкостного топлива исследовались с помощью вискозиметра Rheotest-2, который предназначен для работы с такими жидкостями. Эксперименты выполнялись совместно с лабораторией исследования ВУС Института теплофизики СО РАН. Постоянная комнатная температура термостатирующей жидкости в измерительной системе прибора поддерживается с точностью в 0,2 °С.

Измерительная система ротационного вискозиметра Rheotest-2 представляет собой два соосных цилиндра, из которых внутренний (ротатор) вращается. В узкий зазор между цилиндрами помещается испытываемая жидкость. При заданной скорости сдвига (вращение ротора) в водоугольной суспензии или ИКЖТ по сечению потока Куэтта создается постоянное касательное напряжение сдвига. Возможный диапазон изменения градиентов скорости сдвига находится в пределах  $D = 0,2 \dots 450 \text{ с}^{-1}$ . Из-за вязкости топливной системы в сдвиговом потоке возникают касательные напряжения сдвига порядка  $\tau = 16 \dots 310 \text{ дн/см}^2$ , что соответствует значению динамического коэффициента вязкости  $\mu = 2 \dots 40 \text{ П}$  (0,2...4,0 Па · с). Вычисление вязкости проводилось по формуле

$$\mu = \frac{\tau}{D}, \quad (4.4)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение сдвига, измеряемое в эксперименте. Погрешность измерения вязкости не превышает 3 %.

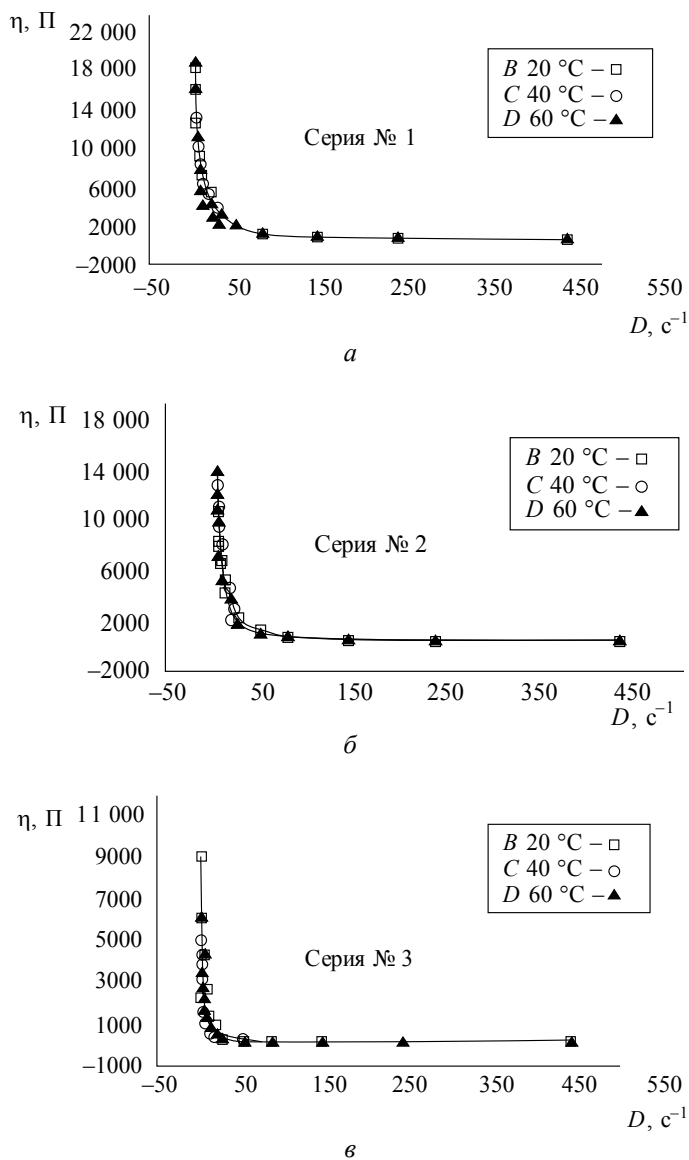
В соответствии с методикой исследования было приготовлено несколько серий искусственного композиционного жидкого топлива.

Серия № 1 (проба № 153):  $W^r = 66,8 \%$ ; уголь (отсевы листованского антрацита) – 20 %; торфяной гель – 8 %, нефть – 8 %.

Серия № 2 (проба № 25):  $W^r = 54,5 \%$ ; уголь 45,5 %.

Серия № 3 (проба № 55):  $W^r = 56,05 \%$ ; уголь 17 %, торфяной гель 10 %; мазут 17 %.

Зависимость динамической вязкости  $\eta(\mu)$  от скорости сдвига  $D$  представлена на рис. 4.15 и 4.16 (см. рис. а, б, в ниже).

Рис. 4.15. Зависимость  $\eta$ – $D$  для ИКЖТ серий № 1, 2, 3

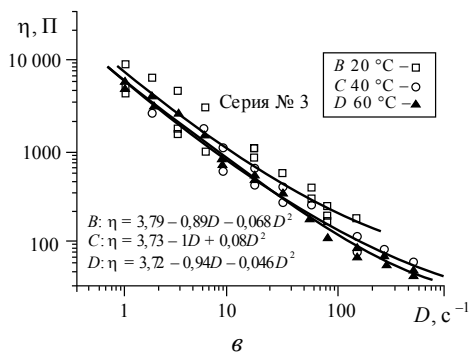
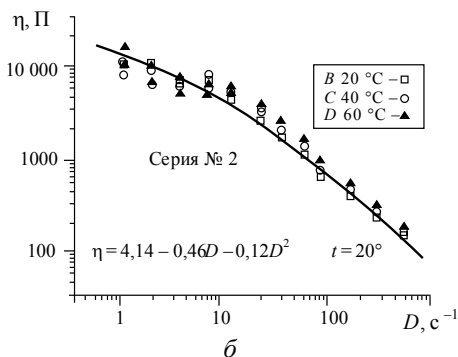
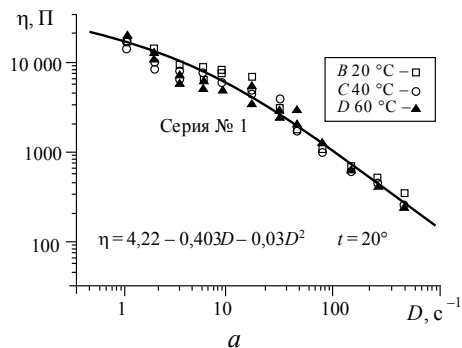


Рис. 4.16. Зависимость  $\eta$ - $D$  для ИКЖТ серий № 1, 2, 3 в логарифмической системе координат



Из этих рисунков следует существенно нелинейный характер зависимостей  $\eta(\mu)$  от  $D$ , что хорошо заметно даже и в логарифмическом анаморфозе, что также подтверждает неньютоновский характер этих жидкостей. Даже для серии № 2, где состав суспензии был на 50 % вода и 50 % антрацит, реологические характеристики не позволяют отнести ВУТ к ньютоновским жидкостям вопреки высказываемому в литературе мнению, что при содержании твердой фазы в суспензии менее 50 % жидкость можно рассматривать как ньютоновскую.

Из рисунков серий № 1 и 2 следует, что вязкость у этих композиций не зависит практически от температуры. Однако для композиции серии № 3 температура влияет на характер кривых, что объясняется, по-видимому, влиянием мазута в составе ИКЖТ.

Во всех случаях серий № 1, 2, 3 в качестве угля использовался горловский антрацит (Листвянский разрез).

С целью линеаризации опытные данные были обработаны в логарифмической системе координат. Во всем исследуемом диапазоне опытные зависимости могут быть аппроксимированы регрессионным уравнением вида

$$\mu = a + bD + cD^2. \quad (4.5)$$

Для ИКЖТ серии № 3 аппроксимация представлена для трех температур.

Расчетная зависимость для течения ИКЖТ в круглой трубе может быть определена по формуле Пуазейля

$$\mu(\eta_3) = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8QL} = \frac{\tau_W}{D}, \quad (4.6)$$

где  $\tau_W = \frac{\Delta P d}{4L}$  – касательное напряжение на стенке трубы диаметром  $d$

и длиной  $L$ ;  $D = 8 \frac{\bar{W}}{d}$  – градиент скорости в трубе, определяемый через среднюю расходную скорость  $\bar{W}$ ;  $\mu$  – наблюдаемая динамическая вязкость, равная эффективной вязкости  $\eta_3$ ;  $Q = \bar{W}S$  – объемный расход через сечение  $S$ ;  $\Delta P = P_1 - P_2$  – перепад давлений.



Коэффициент сопротивления для круглой трубы можно найти из выражения

$$\lambda_f = \frac{8\tau_W}{\rho \bar{W}^2} = \frac{2\Delta P d}{L \rho \bar{W}^2}. \quad (4.7)$$

Оценим вязкость ИКЖТ по сравнению с вязкостью мазута и нефти. Для оценки выберем рабочий диапазон скорости сдвига  $30 \dots 50 \text{ с}^{-1}$ .

Серия № 1 ИКЖТ  $\mu = 3000 \dots 1600 \text{ П}$

Серия № 2 ИКЖТ  $\mu = 3000 \dots 1600 \text{ П}$

Серия № 3 ИКЖТ  $\mu = 3000 \dots 1600 \text{ П}$

В технической системе единиц кинематическая вязкость измеряется в метрах в квадрате на секунду ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

Соотношение между внесистемной единицей 1 П и системной единицей вязкости  $1 \text{ кг} \cdot \text{с}/\text{м}^2$  [200]:

$$1 \text{ П} = 0,0102 \text{ кг} \cdot \text{с}/\text{м}^2.$$

Тогда:

- для серии № 1  $v_1 = 2,88 \dots 1,53 \text{ см}^2/\text{с}$ ;
- для серии № 2  $v_2 = 1,53 \dots 0,961 \text{ см}^2/\text{с}$ ;
- для серии № 3  $v_3 = 0,288 \dots 0,192 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Вязкость мазута согласно паспортным данным

$$\nu = 13,1^\circ \text{ ВУ}_{80}.$$

Соотношение между условной вязкостью ВУ и кинематической вязкостью,  $\text{м}^2/\text{с}$  [185]:

$$\nu = \left( 0,0731^\circ \text{ ВУ} - \frac{0,0631}{0_{\text{ВУ}}} \right) 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Тогда для мазута при рабочей температуре  $80^\circ \text{C}$

$$\nu = 0,952 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с} = 0,952 \text{ см}^2/\text{с}.$$



Для нефти при 20 °С

$$\nu = 2,2 \text{ мм}^2/\text{с} = 0,022 \text{ см}^2/\text{с}.$$

В приведенных выше экспериментах нелинейность реологических характеристик и дилатантность ИКЖТ объясняются во многом наличием в топливной системе пластификаторов и стабилизаторов – торфяного геля, нефти и мазута, но и не только этим. Технология приготовления ИКЖТ такова, что образуется большое количество субуль-традисперсных частиц, а это придает топливной системе коллоидный характер [193, 202].

Интересно сопоставить результаты стандартного исследования с исследованием вязкости у композиционного жидкого водоугольного топлива на основе тугнуйского и холбольджинского углей (Бурятия). ВУТ было приготовлено по традиционной технологии с размерами частиц твердой фазы от 10 до 350 мкм и концентрацией твердой фазы 50 и 55 % по сухой массе.

Исследования были выполнены в Институте теплофизики СО РАН.

Для получения энергетической и экологически чистой ВУС из рядовых углей их обычно обогащают до зольности порядка 10...15 %. Исходя из требований сжигания и приемлемых реологических характеристик суспензии обычно проводят двухстадийное измельчение в шаровых и стержневых мельницах. Из шаровой мельницы суспензия, содержащая водный раствор пластификатора, через систему коммуникаций поступает в стержневую мельницу. Одновременно в стержневую мельницу дозатором непрерывно подается исходный уголь в количестве 70 % от всей загрузки мельниц. Из стержневой мельницы ВУС подается в накопитель, из которого насосом через фильтры тонкой очистки и теплообменник поступает к форсункам.

В результате такого двухстадийного приготовления частицы по размерам составляют: от 10...90 мкм – 65...70 %, от 90 до 250 мкм – 25...30 %, от 250 до 350 мкм – порядка 5 %. Максимальный размер частиц – 350 мкм.

В лаборатории энергетических топлив Института теплофизики СО РАН угольный порошок из углей Тугнуйского, Холбольджинского и Восточного месторождений приготавливался одностадийным сухим помолом лабораторной мельницей. Измельченный уголь проходил гранулометрический отсев на ситах 68 и 315 мкм. В качестве дисперсной среды использовалась водопроводная вода.



Пластификатором, снижающим вязкость ВУС, служили соли сульфанатонафталиноформальдегида в количестве 1 % на сухую массу угля. ВУС приготавлилась концентрацией 50 и 55 % на сухую массу угля. Получить более высокие концентрации ВУС с сохранением приемлемых текучих свойств не удалось. Угольный порошок тщательно смешивался с водой, в которую предварительно добавляли указанный выше пластификатор. Интенсификатор горения и другие добавки в ВУС не вводили. Полученная по такой методике ВУС оказалась устойчивой в условиях статического хранения (~10 суток) и в динамических (вискозиметрических) условиях испытания.

Результаты реологических исследований ВУС показаны на рис. 4.17 и 4.18.

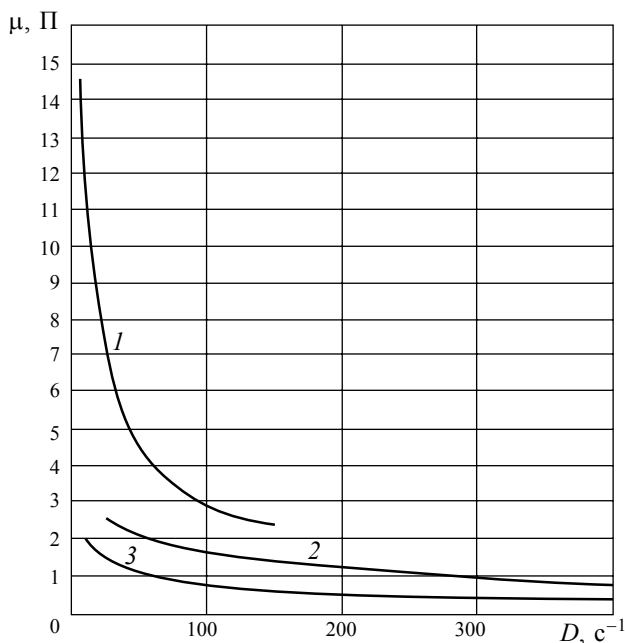


Рис. 4.17. Зависимость коэффициента динамической вязкости  $\mu, П$ , от скорости сдвига  $D, c^{-1}$ :

- 1 – холбольджинский уголь, размер частиц 315 мкм,  $C_y = 50 \%$ ;
- 2 – тугнуйский уголь, размер частиц 68 мкм,  $C_y = 50 \%$ ;
- 3 – тугнуйский уголь, размер частиц 315 мкм,  $C_y = 50 \%$

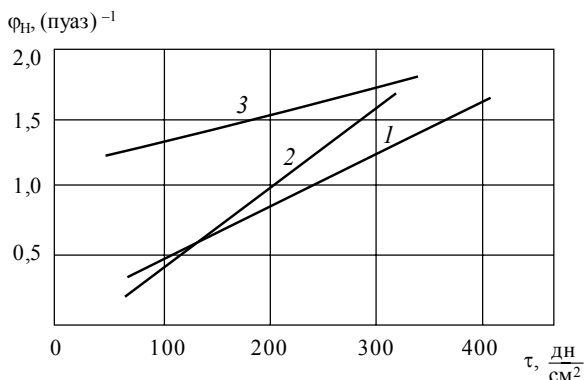


Рис. 4.18. Зависимость текучести ВУС от напряжения сдвига:

1 – холбольджинский уголь, частицы 315 мкм,  $n = 10$ ;

2 – тугнуйский уголь, частицы 68 мкм,  $n = 1$ ;

3 – тугнуйский уголь, частицы 315 мкм,  $n = 1$

Испытаниями установлено, что в отличие от ньютоновских жидкостей вязкость ВУС – величина не постоянная, а существенно зависящая от скорости сдвига, концентрации твердой фракции, гранулометрического состава, температуры среды, элементного и химического состава углей. Это обстоятельство говорит о том, что обычные, хорошо зарекомендовавшие себя методы и формулы расчета гидродинамики и тепломассообмена ньютоновских жидкостей для трубопроводного гидротранспорта и распыла ВУС неприемлемы. Для оптимального расчета камерно-расходных характеристик (скоростей, гидравлических сопротивлений, перепадов давлений и т. п.) в гидравлических системах подачи ВУС в топочное пространство или в трубопроводных системах дальнего гидротранспорта для ВУС необходимы лишь адекватные их поведению нелинейные методы расчета. Анализ первичных данных по вязкости в координатах  $\phi$ – $\tau$ , где  $\phi = \mu^{-1}$  – текучесть, а  $\tau$  – напряжение сдвига, показал (см. рис. 4.17), что они в достаточно широком для практики интервале удовлетворительно аппроксимируются линейной зависимостью

$$\phi = \phi_0 + \theta\tau, \quad (4.8)$$





где  $\varphi_0$  – текучесть при  $\tau \rightarrow 0$ ;  $\theta$  – коэффициент структурной нестациональности ВУС;  $\varphi = \tau^{-1} \left( \frac{dW}{dr} \right)$  – текучесть ВУС;  $\frac{dW}{dr}$  – градиент скорости сдвига  $\left( \frac{dW}{dr} = D \right)$ .

Из условия баланса поверхностных сил, действующих на выделенный в трубопроводе элементарный цилиндр ( $\Delta p \pi r^2 = 2\pi r L$ ), следует, что распределение касательных напряжений по сечению трубы имеет вид:

$$\frac{\tau}{\tau_W} = \frac{r}{R} = \xi, \quad (4.9)$$

где  $r$  – текущий радиус трубы;  $\tau_W$  – касательное напряжение сдвига на стенке трубопровода, равное  $\tau_W = \frac{\Delta p R}{2L}$  ( $\Delta p = p_1 - p_2$  – перепад давления).

С учетом (4.8) и (4.9) можно записать выражение для средней (расходной) скорости потока ВУС в трубопроводе:

$$W = 2 \int_0^1 W_x \xi d\xi = 0,25\varphi_0 R \tau_W + 0,2R\theta \tau_W \quad (4.10)$$

и выражение для безразмерной скорости потока:

$$\omega = \frac{W_x}{\langle W_x \rangle} = 2 \frac{1 - \xi^2 + \frac{2}{3} \frac{\theta}{\varphi_0} \tau_W (1 - \xi^3)}{1 + \frac{4}{5} \frac{\theta}{\varphi_0} \tau_W}. \quad (4.11)$$

Из формулы (4.11) следует, что безразмерные профили скоростей при течении ВУС в круглых трубах характеризуются параметром

$$\frac{\theta \tau_W}{\varphi_0}. \quad (4.12)$$



В отличие от течения обычных ньютоновских жидкостей, у которых  $\theta = 0$  (вода, глицерин, масло), профили скоростей более заполнены (рис. 4.19), а градиент скорости у стенки больше. Для больших значений параметра  $\theta\tau_W/\varphi_0$  градиенты скоростей в ядре потока небольшие и вследствие этого течение ВУС в значительной части сечения трубы ( $\xi = 0,5$ ) происходит с неразрушенной структурой (рис. 4.20 и 4.21).

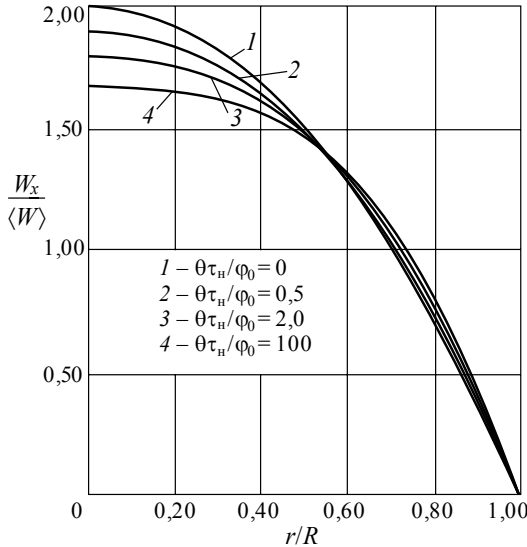


Рис. 4.19. Профили скоростей при течении ВУС в трубе

С учетом формул (4.10) и (4.11) выражение для коэффициента гидравлического сопротивления при течении ВУС в круглой трубе имеет вид

$$\xi = \frac{8\tau_W}{\rho\langle W \rangle^2} = \frac{5}{\beta_0} \left[ \left( 1 + \frac{128}{5} \frac{\beta_0}{\text{Re}_0} \right)^{0,5} - 1 \right]. \quad (4.13)$$

Здесь

$$\beta_0 = \frac{\theta}{\varphi_0} \rho \langle W \rangle^2, \quad \text{Re}_0 = \varphi_0 \rho \langle W \rangle d. \quad (4.14)$$

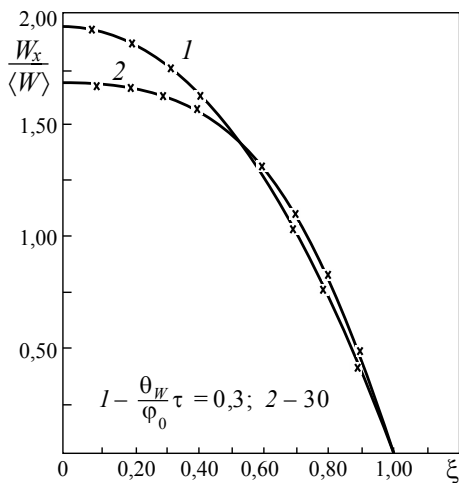


Рис. 4.20. Профили скоростей при течении ВУС в круглой трубе:

1 – Тугнуйское месторождение угля;  
2 – Холбольджинское месторождение угля

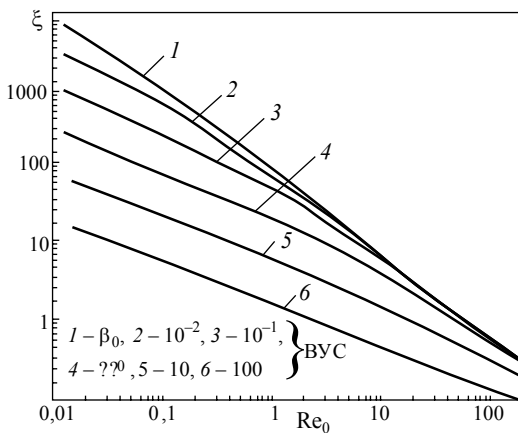


Рис. 4.21. Зависимость коэффициента сопротивления при течении ВУС в круглой трубе от числа  $Re_0$  и параметра  $\beta_0 = \theta / \phi_0 \rho \langle W \rangle^2$



Для конкретной водоугольной суспензии, определенной параметром  $\beta_0$ , и данной производительности трубопровода можно найти необходимую величину перепада давления.

Кроме композиции с углями и жидкостями различных типов, таких как мазут, сырая нефть, торфяной гель, исследовалась вязкость композиции ИКЖТ с глицерином [202].

В качестве ИКЖТ для исследований были приготовлены две композиции:

№ 1. Каменный уголь марки ССР – 60 %, технический глицерин – 20 %, вода 20 %;

№ 2. Бурый уголь Б2Р – 50 %, технический глицерин – 25 %, вода – 25 %.

При изготовлении жидких топлив было установлено, что композиция № 1 неожиданно оказалась очень вязкой, и только при применении специального «разжижителя» (1...2 промилле) удалось получить пригодную субстанцию. Композиция № 2 каких-либо сложностей при составлении и работе с ней не вызывала.

Исследование вязкости композиций № 1 и № 2 выполнялось с использованием ротационного вискозиметра Rheotest-2. На рис. 4.22 представлена зависимость динамической вязкости образцов ИКЖТ от скорости сдвига. Рабочий диапазон скоростей сдвига в трубопроводе ИКЖТ в котельной или на электрической станции лежит в интервале  $(30...50) \text{ с}^{-1}$ . Меньшее значение соответствует перекачивающим топливным трубопроводам, большее – трубопроводам подачи топлива к форсункам в обвязке котла.

Таким образом, динамическая вязкость в рабочем диапазоне скоростей сдвига для ИКЖТ композиции № 1 лежит в интервале

$$(8,2 < \mu < 14) \text{ П},$$

что является нежелательной величиной для вязкости топлива.

Для композиции № 2 динамическая вязкость составляла

$$(1 < \mu < 3) \text{ П},$$

что вполне приемлемо для жидких энергетических топлив.

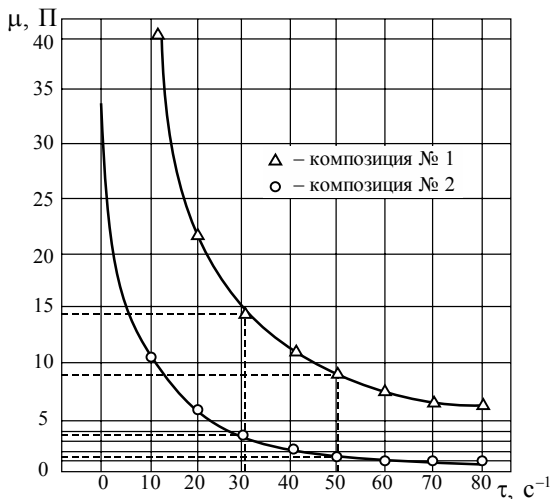


Рис. 4.22. Зависимость вязкости от напряжения сдвига:

композиция № 1: 60 % каменный уголь, 20 % технический глицерин, 20 % вода; композиция № 2: 50 % бурый уголь, 25 % технический глицерин, 25 % вода

Причиной высокой вязкости ИКЖТ с каменным углем могут служить различные факторы, в том числе состав минеральной части. Она может быть устранена в процессе разработки топлива.

Таким образом, можно сказать следующее.

1. ИКЖТ является неньютоновской жидкостью дилатантного типа, и, по-видимому, ее вязкость должна описываться моделью Гершеля–Баркли

$$\tau = m\gamma^n + \tau_y,$$

где  $n > 1$ .

2. В узком диапазоне рабочего сдвига скорости динамическая вязкость ИКЖТ может быть аппроксимирована регрессионным уравнением вида

$$\mu = a + bD + cD^2,$$

где  $D$  (с<sup>-1</sup>) – скорость сдвига, а значение сопротивления рассчитано по формулам Пуазейля.



3. Различные композиции ИКЖТ и ВУС с различными углями и содержанием твердой фазы  $\sim 0,5$  имеют близкие значения вязкости в рабочем диапазоне скоростей сдвига и сопоставимые с вязкостью энергетических жидких топлив. Не подтверждается высказываемое в технической литературе мнение о повышенной вязкости ИКЖТ как коллоидного топлива.

4. При составлении композиции ИКЖТ введение в топливную систему некоторых органических жидкостей может резко увеличить вязкость, что, по-видимому, связано с составом минеральной части угля. Однако это можно устранить добавкой специального «растворителя» в количестве 1...2 промилле. Этот же прием может быть применен при увеличении содержания твердой фазы до 65...70 %.

### **4.3. ИССЛЕДОВАНИЕ СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИСКУССТВЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА**

Седиментационная устойчивость ИКЖТ исследовалась для топлив марки А (горловский антрацит) и Д (долинский каменный уголь Быковского разреза II-12, Сахалин) [193].

Особенностью порошка быковского угля Д-12 являются адгезивные свойства в водных смесях. Переработка этого порошка в кавитаторе с водой показала, что образующееся водоугольное топливо обладает хорошо выраженными коллоидными свойствами.

Были приготовлены водоугольные топлива на основе антрацита (массовые доли)

№ 1: уголь – 0,5; вода – 0,5;

№ 2: уголь – 0,6; вода – 0,4,

а также ИКЖТ с добавкой сырой нефти:

А: уголь – 0,375; нефть – 0,25; вода – 0,375;

Б: уголь – 0,45; нефть – 0,10; вода – 0,45;

В: уголь – 0,475; нефть – 0,05; вода – 0,475;

Г: уголь – 0,46; нефть – 0,08; вода – 0,46.



Наблюдения за суспензиями № 1 и № 2 и сериями ИКЖТ показали, что в суспензиях при хранении их в слое 0,3...0,4 м в течение 30 суток наблюдается некоторая дифференциация плотности на высоте, однако без выпадения осадка.

ИКЖТ оказалось хорошо стабилизированным. Составы Б, В, Г не претерпевали никаких изменений при хранении в течение 6 месяцев и более. Состав А после этого срока стал несколько меняться: появились флоккулы в виде рыхлых комков в толще топлива, но стратификации топлива в целом не происходило.

Было замечено, что при хранении ИКЖТ происходит его созревание, улучшается текучесть, оно становится более гомогенным.

При наблюдении за стабильностью ИКЖТ мы перевозили топливо автомобильным транспортом на расстояние 500 км и авиатранспортом на расстояния до 5000 км. В целом наблюдение составило около одного года, за это время образцы топлива ИКЖТ серии Б, В, Г сохраняли седиментационную устойчивость.

Устойчивость коллоидного ИКЖТ значительно выше, чем у угольных суспензий, приготовленных традиционным способом (20...30 суток), и у ВУТ, у которого согласно нормативу Японской топливной корпорации устойчивость должна быть не менее 60 суток (см. гл. 3).

Было выполнено исследование седиментационной устойчивости ИКЖТ с содержанием технического глицерина. В качестве объекта исследования использовалась композиция состава: бурый уголь Б2 – 50 % по массе, глицерин – 25 % по массе и 25 % – вода [202]. Исследования выполнялись в соответствии с методикой JGC CWM/WEST Japan CWV (см. гл. 3).

В соответствии с методикой пробу ИКЖТ примерно 0,5 кг в течение определенного времени хранят в герметично закрытой банке.

Через некоторое время (в нашем случае через 10 суток) из банки топливо выливают:

- в течение первых трех секунд в отдельную емкость;
- в продолжение от трех секунд до пяти минут остатки – во вторую отдельную емкость;
- в течение пяти минут после этого – в третью отдельную емкость.



В каждой пробе определяют  $C_{\text{угл}}$  – процентное содержание угля. Затем рассчитывают процентное содержание от общего количества в каждой пробе до испытаний  $M'_{\text{угл}}$  и после испытаний  $M''_{\text{угл}}$ :

$$M''_{\text{угл}} = \frac{C_{\text{угл}} C_{\text{угл}}}{100}.$$

Порядок вычисления времени стабильности топливной системы определялся в соответствии с табл. 4.8.

Таблица 4.8

### Результаты испытаний композиции

| Время выдержки<br>$\tau$ | Масса<br>$W$ | Массо-<br>вая<br>доля<br>$C_i$ | Кон-<br>цент-<br>рация<br>$C_{\text{угл}}$ | До испы-<br>тания<br>$M'_{\text{угл}}$ | После испы-<br>тания<br>$M''_{\text{угл}}$ | Доля<br>воды<br>$M_{\text{вод}}$ | Скорость<br>седимен-<br>тации<br>$D_{\text{н}}$ |
|--------------------------|--------------|--------------------------------|--|--|--|----------------------------------|---|
| 10 суток                 | г.           | %                              | %  | %                                      | %  | %                                | %   |
| –3 с                     | 368          | 73,6                           | 48,98                                      | 39,43                                  | 36,43                                      | 39,43                            | –3,0  |
| От 3 с<br>до 5 мин       | 51           | 10,2                           | 50,2                                       | 4,10                                   | 5,10                                       | 4,10                             | +1,0  |
| +5 мин                   | 81           | 16,2                           | 52,3                                       | 6,48                                   | 8,48                                       | 6,47                             | +2,0  |
| Итого                    | 500          | 100                            |  | 50                                     | 50   | 50                               |   |

Скорость седиментации угля в каждой пробе определяется как

$$D_i = M''_{\text{угл}_i} - M'_{\text{угл}_i},$$

т. е. для первых трех секунд

$$D_1 = 36,43 - 39,43 = -3,0 \text{ \%}.$$

Для второго периода от 3 с до 5 мин

$$D_2 = 5,10 - 4,10 = +1,0 \text{ \%}$$





и для третьего периода, последующие 5 мин,

$$D_3 = 8,48 - 6,48 = +2,0 \text{ \%}.$$

Испытания продолжались 10 суток. Таким образом, скорость отложения угольных частиц в сутки, т. е. показатель стабильности  $V$ , можно выразить в виде

$$V = \frac{(D_1 + D_2)}{\tau} \left( \frac{\%}{\text{сутки}} \right).$$

Следовательно,

$$V = \left( \frac{1,0 + 2,0}{10} \right) = \left( 0,3 \frac{\%}{\text{сутки}} \right).$$

Определим период полной дестабилизации композиции. Он составляет

$$\tau = \frac{1}{V} = \frac{1}{0,003} = 333 \text{ суток}.$$

Седиментационная устойчивость ИКЖТ наблюдалась в течение одного года. За это время топливная система сохранялась без расслоения при добавках органических стабилизаторов не более 10 %. При увеличении доли сырой нефти до 25 % в системе после 6 месяцев хранения начиналась флокулизация, приводящая к нарушению однородности топлива.

Коллоидное ИКЖТ – значительно более устойчивое топливо, чем ВУС и ВУТ, изготовленные по традиционным технологиям.

Седиментационная устойчивость ИКЖТ достаточна с точки зрения технологических и коммерческих требований к топливу.

## 4.4. РАСПЫЛЕНИЕ ИКЖТ ФОРСУНКАМИ

### 4.4.1. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ФОРСУНКИ ДЛЯ ВУТ-ИКЖТ

Пневматическое распыление жидкого топлива используют обычно в котлах малой паропроизводительности до 30 т/ч. Распыление осуществляется воздухом под давлением 6...12 бар. При распылении



мазута воздух может быть подогрет до 200...230 °С. Однако при распыле ИКЖТ необходимость подогрева воздуха, как это следует из исследований вязкости, не столь актуальна, как для мазута.

Размеры капель распыленного мазута, как и капель ИКЖТ, составляют 25...30 мкм. Внутри капли располагается до 2000...3000 микро-частиц угля, которые образуют сферический слой по периферии капли. После испарения воды капли образуют так называемую «char» (англ.) – обугленную сферическую структуру, из которой в конце процесса выгорания получается сферическая зольная частица.

Зольные микросферы и их фракции представляют интерес как наполнители бетона, улучшающие его качество.

Изучение распыла ИКЖТ пневматическими форсунками требует специальной методики исследования, которая позволяет ответить на вопросы формирования факела распыла и распределения капель в факеле в зависимости от физико-технических характеристик топливной системы и воздушного потока в форсунке.

Результаты исследования зависят от конструкции форсунки, наличия противодавления, характеристик крутки потока вторичным воздухом и т. п.

В настоящем разделе представлены результаты моделирования распыла ИКЖТ воздушной форсункой определенной конструкции в условиях опытно-промышленного эксперимента. Испытания форсунок выполнялись на модульных компонентах – воде и воздухе и проводились в условиях атмосферного противодавления и с воздушным противодавлением  $P_{\text{пр}} = (6^{+1}) \text{ кгс/см}^2$ , на натуральных компонентах ИКЖТ и воздухе.

#### 4.4.2. КОНСТРУКЦИЯ ФОРСУНКИ

В исследованиях применялись двухкомпонентные эмульсионные форсунки со струйной подачей воздушно-кислородной смеси (ВКС) и ИКЖТ. Конструкция форсунки показана на рис. 4.23. Внешний вид форсунки – на рис. 4.24.

Форсунка представляет собой газовый канал для подачи ВКС, в который через струйные отверстия  $B$ , расположенные под углом к оси форсунки, впрыскивается ИКЖТ. Основные параметры форсунки представлены в табл. 4.9.



Таблица 4.9

## Основные параметры форсунки

| №<br>п/п | Наименование параметра                                | Значение параметра |
|----------|---|--------------------|
|          | <i>Параметры окислителя</i>                           |                    |
| 1        | Расход воздуха, кг/с                                  | 0,0541             |
| 2        | Расход кислорода, кг/с                                | 0,0348             |
| 3        | Суммарный расход ВКС, кг/с                            | 0,0889             |
| 4        | Давление ВКС на входе в форсунку, кгс/см <sup>2</sup> | 12                 |
| 5        | Температура ВКС на входе, °С                          | 150                |
| 6        | Перепад давлений, кгс/см <sup>2</sup>                 | 5                  |
|          | <i>Параметры горючего</i>                             |                    |
| 7        | Расход ИКЖТ, кг/с                                     | 0,103              |
| 8        | Давление ИКЖТ на входе, кгс/см <sup>2</sup>           | 12                 |
| 9        | Температура ИКЖТ на входе, °С                         | 25                 |
| 10       | Перепад давлений, кгс/см <sup>2</sup>                 | 5                  |

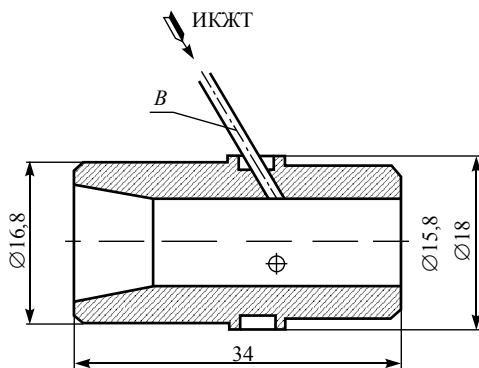


Рис. 4.23. Форсунка для испытаний



Рис. 4.24. Внешний вид форсунок

Схема проливки водой без противодействия и с воздушным противодействием отверстий *В* форсунки представлена на рис. 4.25.

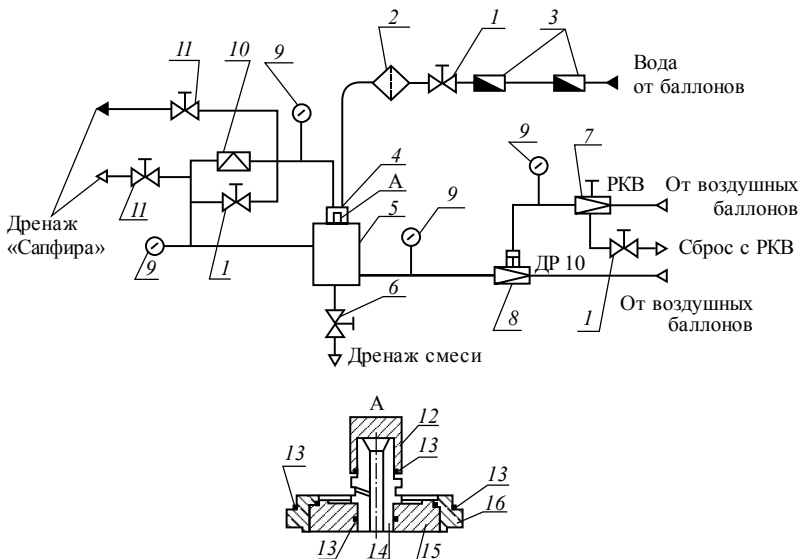


Рис. 4.25. Стенд для пневмогидравлических испытаний форсунок:

1 – вентиль; 2 – фильтр; 3 – расходомер; 4 – приспособление; 5 – барокамера; 6 – дроссель; 7 – редуктор командного воздуха; 8 – дистанционный редуктор; 9 – манометр; 10 – ПРД «Сафир»; 11 – кран запорный; 12 – заглушка; 13 – кольцо; 14 – форсунка; 15 – вставка; 16 – донышко

В случае проливки водой форсунок без противодавления система подачи воздуха в барокамеру и сама барокамера не используются.

#### 4.4.3. СТЕНД ДЛЯ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ФОРСУНОК НА МОДЕЛЬНОМ И НАТУРНОМ КОМПОНЕНТАХ

Для пневмогидравлических испытаний форсунок на модельном и натурном компонентах создан специальный испытательный участок на стенде, схема которого показана на рис. 4.26. При испытании на ИКЖТ система, обеспечивающая противодавление, не использовалась. Внешний вид стенда представлен на рис. 4.27.

Подача рабочего тела (воды, ИКЖТ) осуществляется от системы баллонов 20 л каждый, заполненных смесью, под давлением надуваемого воздуха от пневмосистемы 350 кгс/см<sup>2</sup>.

Требуемый режим (расход) по линии подачи ИКЖТ обеспечивается поддержанием нужного давления надува воздуха от стендовой

пневмосистемы в баллоны со смесью с помощью редуктора командного давления РКВ4 и стенового вентиля DN4 и регулировкой расхода смеси вентилями DN10 на выходе из баллонов. Расходомер для измерения расхода ИКЖТ устанавливается на выходе из баллонов и входе в приспособление с форсункой.

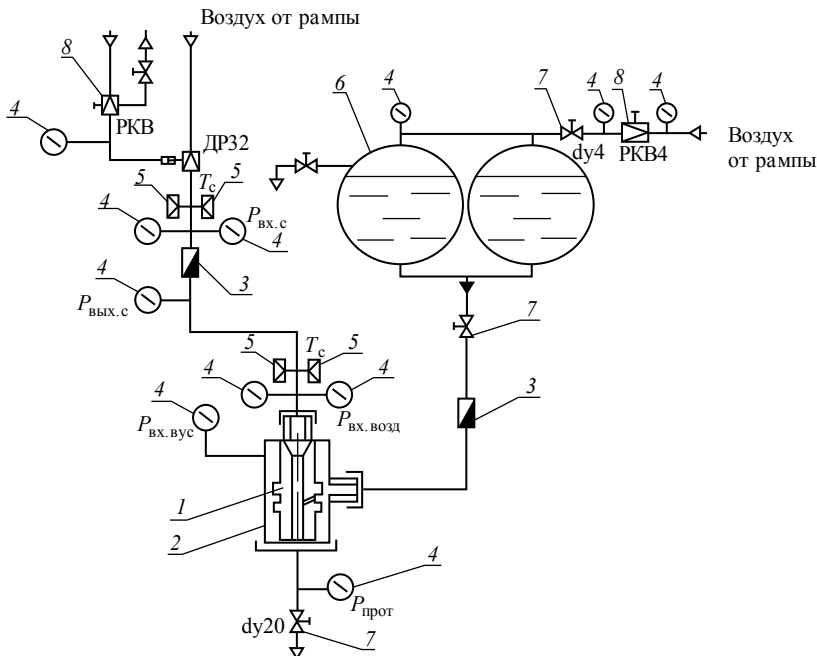


Рис. 4.26. Стенд для изучения распыла топлива форсунками:

1 – форсунка; 2 – приспособление; 3 – расходомер; 4 – манометр; 5 – термомпара; 6 – система шаров баллонных; 7 – вентиль; 8 – редуктор командного давления РКВ

Подача воздуха по линии ВКС происходит от пневмосистемы 150 кгс/см<sup>2</sup>. Требуемый расход воздуха через форсунку устанавливается с помощью редуктора командного давления РКВ и поддерживается редуктором давления ДР32 с дистанционным пневмоуправлением. Расходомер воздуха при испытаниях устанавливается перед испытываемой форсункой.

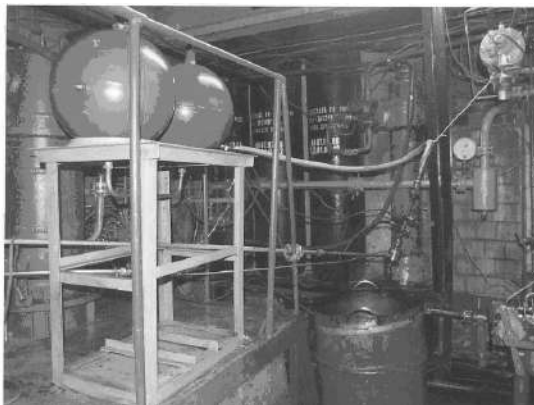


Рис. 4.27. Внешний вид стенда

Для установки форсунки при испытаниях используется специальное технологическое приспособление, обеспечивающее герметичность соединений с коллекторами подвода и с местом отбора давления. Подвод рабочего тела к приспособлению с форсункой осуществляется через стендовые переходники. Стендовые переходники, подводящие рабочее тело к приспособлению, имеют места отбора давлений и температур.

В соответствии со схемой испытаний измеряются следующие параметры водоугольного топлива и воздуха:

- давление ИКЖТ на входе в форсунки;
- расход ИКЖТ через отверстие  $B$  форсунки;
- давление перед сужающим устройством расходомера;
- температура перед сужающим устройством расходомера;
- давление воздуха перед форсункой;
- температура воздуха перед форсункой.

Для измерения давлений ИКЖТ выбраны технические манометры типа МТИ-160 класса точности 0,6.

Для измерения расхода ИКЖТ применялся расходомер турбинного типа ТДР7 с диапазоном измерения 0,03...0,16 л/с с погрешностью измерения  $\pm 1\%$ .

Для измерения температур воздуха на входе в приспособление с форсункой и перед сужающим устройством расходомера использовались преобразователи температуры типа ТМ-119 с погрешностью измерения  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .



Для измерения расхода воздуха выбран критический расходомер с диапазоном критического сечения сужающего устройства 3,821 мм. Погрешность калибровки всех используемых расходомеров  $\pm 0,35 \%$  при доверительной вероятности 0,95. Ожидаемая погрешность измерения расхода воздуха не превышает  $\pm 1 \%$ .

#### **4.4.4. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАСПЫЛА ТОПЛИВА ФОРСУНКАМИ**

Стенд включает в себя системы: гидравлическую; воздушную; измерений; пневмоуправления.

Гидравлическая система предназначена для подвода рабочего тела (воды) к испытываемому узлу. Подвод осуществляется от баллонов.

Воздушная система предназначена для подачи сжатого воздуха из воздушных баллонов в водяные для вытеснения рабочей жидкости и управления пневмоклапанами.

Система измерений предназначена для контроля и измерения параметров (расхода рабочей жидкости, давления, перепада давлений, температуры) и включает в себя: манометры технические; преобразователи разности давлений (ПРД) типа «Сапфир»; термометры сопротивления, а также систему запорных и разделительных вентилей.

Система пневмоуправления предназначена для дистанционного управления редуктором, отсечными клапанами, приспособлением для испытания форсунки.

Схема испытательного стенда приведена на рис. 4.26, а его внешний вид на рис. 4.27.

#### **4.4.5. ВЫБОР МОДЕЛЬНОГО РЕЖИМА ВОЗДУХА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ФОРСУНОК С ВОЗДУШНЫМ ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ**

Определяющим критерием подобия при расчете модельных режимов испытаний форсунки являются числа Рейнольдса и Маха.

Расход модельного газа (воздуха) из условия равенства чисел Рейнольдса на модельном и натурном режиме определяется по формуле

$$m_M = m_H \frac{\mu_M}{\mu_H}, \quad (4.15)$$

где  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости;  $m$  — массовый расход.



Индекс «н» относится к натурному газу (смеси «кислород–воздух»), индекс «м» – к модельному (воздух).

Коэффициент динамической вязкости смеси «кислород–воздух» определяется по формуле

$$\mu_{\text{смеси}} = \frac{100}{\frac{G_{\text{к}}}{\mu_{\text{к}}} + \frac{G_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}}}, \quad (4.16)$$

где  $G_{\text{к}} = \frac{m_{\text{к}} \cdot 100}{m_{\text{к}} + m_{\text{в}}}$ ;  $G_{\text{в}} = \frac{m_{\text{в}} \cdot 100}{m_{\text{к}} + m_{\text{в}}}$ ;  $m_{\text{к}}$  – массовый расход кислорода в смеси;  $m_{\text{в}}$  – массовый расход воздуха в смеси;  $\mu_{\text{к}}$  – коэффициент динамической вязкости кислорода;  $\mu_{\text{в}}$  – коэффициент динамической вязкости воздуха.

В результате расчетов по формуле (4.16) получим коэффициент динамической вязкости смеси «кислород–воздух»  $\mu_{\text{смеси}} = 25,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

В результате расчета по формуле (4.15) модельный расход воздуха  $m_{\text{в}} = 65,4 \text{ г/с}$ .

Расход воздуха на модели при продувке с противодавлением выбран несколько выше расчетного с целью обеспечения автомоделности с модельным расходом воздуха в условиях атмосферного противодействия.

Давление модельного газа из условия равенства чисел Маха определяется по формуле

$$P_{\text{м}} = P_{\text{н}} \frac{m_{\text{м}}}{m_{\text{н}}} \sqrt{\frac{R_{\text{м}} T_{\text{м}} K_{\text{н}}}{R_{\text{н}} T_{\text{н}} K_{\text{м}}}}. \quad (4.17)$$

Универсальная газовая постоянная для ВКС определяется по формуле

$$R_{\text{смеси}} = \sum g_i R_i, \quad (4.18)$$

где  $g_i = \frac{m_i}{m_1 + m_2}$ , индекс  $i = 1, 2$  ( $1$  – относится к кислороду,  $2$  – к воздуху).





Универсальная газовая постоянная для смеси «кислород–воздух», рассчитанная по формулам (4.17) и (4.18), равна

$$R_{\text{смеси}} = 276,43 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Величина давления перед форсункой при испытаниях на модельных режимах, определенная по формуле (4.17),  $P_{\text{м}} = 9,1 \text{ кгс/см}^2$ .

#### 4.4.6. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Испытания на компонентах «вода–воздух» проводились в определенной последовательности:

- гидравлические испытания в заданном диапазоне расходов воды в условиях атмосферного противодавления (без противодавления) и с воздушным противодавлением ( $6^{+1}$ ),  $\text{кгс/см}^2$ , и ( $25^{+2}$ ),  $\text{кгс/см}^2$ ;
- газодинамические испытания в заданном диапазоне расходов воздуха в условиях атмосферного противодавления (без противодавления) и с воздушным противодавлением ( $6^{+1}$ ),  $\text{кгс/см}^2$ ;
- пневмогидравлические испытания в заданном диапазоне расходов воды по отверстиям  $B$  при продувке модельным расходом воздуха в условиях атмосферного противодавления и с воздушным противодавлением ( $6^{+1}$ ),  $\text{кгс/см}^2$ .

Испытания на компонентах «ИКЖТ + воздух» проводились в такой последовательности:

- пневмогидравлические испытания в заданном диапазоне расходов ИКЖТ при продувке модельным расходом воздуха в условиях атмосферного противодавления;
- гидравлические испытания в заданном диапазоне расходов ИКЖТ в условиях атмосферного противодавления.

Массовая доля твердой фазы в ИКЖТ в образцах топлива для испытаний составляла 0,65.



#### 4.4.7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты гидравлических испытаний форсунок представлены в протоколах. По результатам испытаний построены графики зависимостей  $m_B = f\sqrt{(\Delta p)}$  в условиях атмосферного противодавления,  $(6^{+1})$ , кгс/см<sup>2</sup>, и  $(25^{+2})$ , кгс/см<sup>2</sup> (рис. 4.28).

Анализ данных, представленных в протоколах и на рис. 4.28, показывает, что графики зависимостей  $m_B = f\sqrt{(\Delta p)}$  в диапазоне расходов воды 80...150 г/с имеют линейный характер, результаты проливов по отверстиям  $B$  в условиях противодавления  $(6^{+1})$ , кгс/см<sup>2</sup>, и  $(25^{+2})$ , кгс/см<sup>2</sup>, совпадают.

Результаты испытаний форсунок при проливке отверстий  $B$  ИКЖТ и продувке воздухом в условиях атмосферного противодавления представлены в протоколах и на графике зависимости (рис. 4.28 и 4.29)  $f\sqrt{(\Delta p)} = f(m_{\text{ИКЖТ}})$ .

Из данных, приведенных в протоколах испытаний и на рис. 4.28 и 4.29, видно, что при расходе водоугольной суспензии  $m_{\text{ИКЖТ}} = 103$  г/с перепад давления по отверстиям  $B$  составил  $\Delta p_{\text{ИКЖТ}}^{\text{без прот}} = 4,8$  кгс/см<sup>2</sup>, перепад давления при модельном расходе воздуха  $m_{\text{воздуха}}^{\text{без прот}} = 23$  г/с по линии воздуха составил  $\Delta p_{\text{воздуха}}^{\text{без прот}} = 1,84$  кгс/см<sup>2</sup>.

Пневмогидравлические характеристики форсунок стабильны.

При совместных испытаниях при проливке отверстий  $B$  ИКЖТ расходом 103 г/с и продувке воздухом  $m_{\text{воздуха}}^{\text{без прот}} = 23$  г/с в условиях атмосферного противодавления фотографировали факел распыла форсунки. Факел распыла форсунки при проливке ее ИКЖТ практически не изменился по сравнению с полученным факелом при проливке ее водой, это наглядно видно из сравнения факелов, показанных на рис. 4.30 и 4.31.

Сравнение характеристик работы форсунки на ИКЖТ и воде приведено на рис. 4.32.

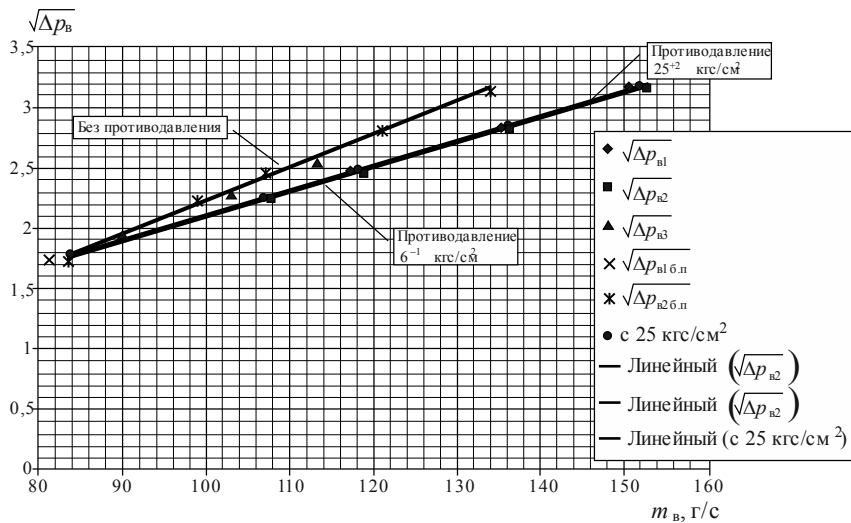


Рис. 4.28. Графики зависимостей  $m_B = f(\sqrt{\Delta p_B})$

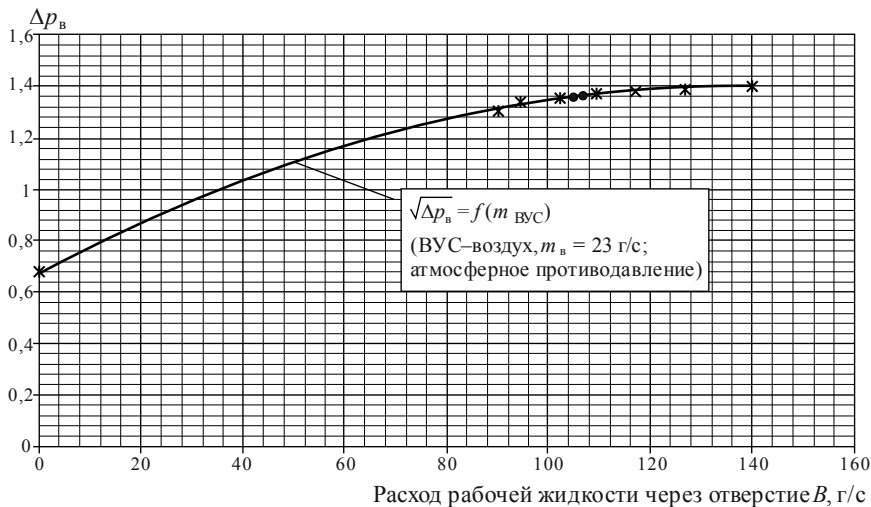
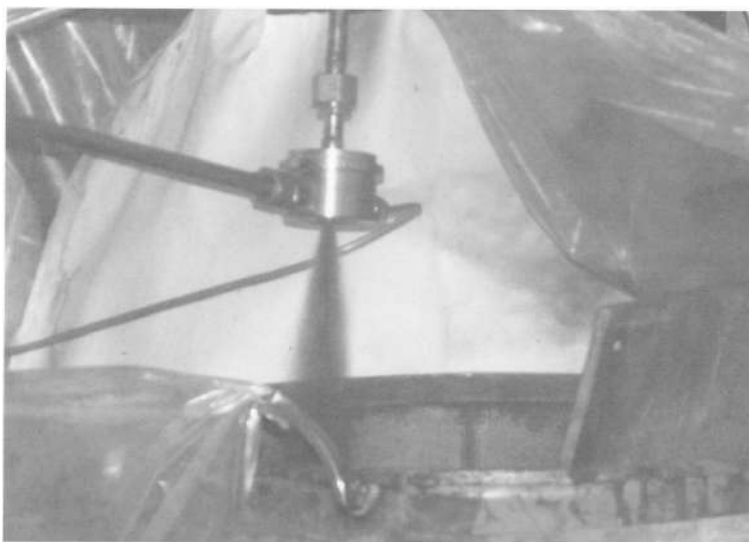


Рис. 4.29. Графики зависимости перепада давлений воздуха по соплу D9.1 от расхода рабочей жидкости через отверстие  $B$  форсунки № 2 (при плотности ВУС  $1,33 \text{ г/см}^3$ )



*а*



*б*

*Рис. 4.30. Работа форсунок на воде и ИКЖТ*

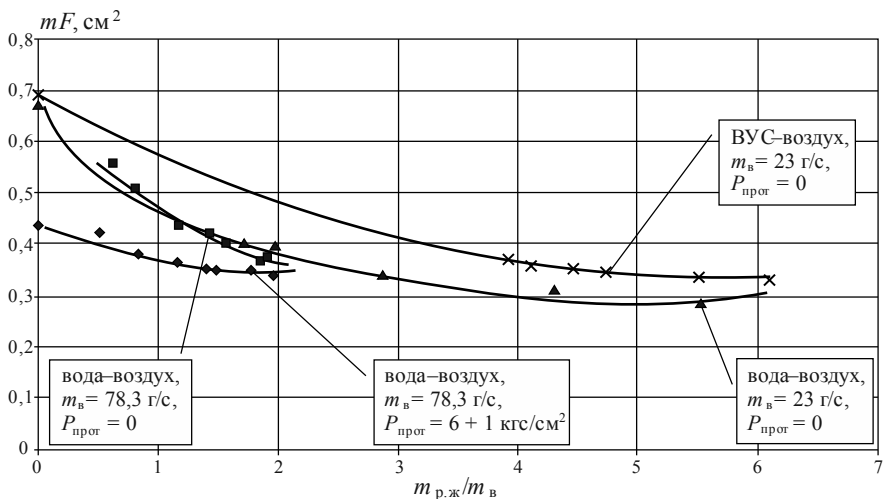


Рис. 4.31. Зависимость коэффициента расхода по воздуху (сопло D9.1 мм) от отношений расхода рабочей жидкости через отверстие В к расходу воздуха через сопло D9.1 мм

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Испытания форсунок, выполненные в опытно-промышленных условиях, продемонстрировали удовлетворительный распыл ИКЖТ и моделируемость распыла топлива водой на различных режимах.

2. Существенных различий при формировании факела распыла на ИКЖТ и на воде не обнаружено.

## **ГЛАВА 5**

### **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИКЖТ**

#### **5.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ**

##### **5.1.1. ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ПРОЕКТ И ИНВЕСТИЦИИ [214, 215]**

**П**онятие «инвестиционный проект» (ИП) употребляется в литературе в двух смыслах:

- как дело, деятельность, система мероприятий или комплекс каких-либо действий, обеспечивающих достижение определенных целей (получение определенных результатов);
- как совокупность организационно-правовых и расчетно-финансовых документов, необходимых для осуществления указанных выше действий или описывающих такие действия.

Инвестиционные проекты различаются прежде всего по своим масштабам и объектам инвестирования. Наиболее распространенные и простые из них связаны со снижением затрат (проекты, снижающие эксплуатационные издержки производственных процессов). Наиболее крупные предусматривают реконструкцию или строительство предприятий, покупку компаний.

ИП существуют обычно в виде некоторого множества альтернативных вариантов, реализация которых сопряжена с необходимостью осуществления инвестиций (инвестированием).

Инвестиции – это денежные средства и иные виды ценностей (машины, оборудование и другое имущество, ценные бумаги, недвижи-



мость, паи в уставных капиталах предприятий, нематериальные активы), вкладываемые в объекты предпринимательской и других видов деятельности в целях получения прибыли (дохода) или/и достижения положительного социального эффекта.

Субъектом инвестиций (реципиентом) является предприятие (организация), использующая инвестиции.

Инвестор – физическое или юридическое лицо, производящее вложения указанных выше средств и ценностей.

По источникам образования инвестиции подразделяются на две группы: собственные и заемные.

Собственные: финансовые ресурсы (прибыль, амортизационные отчисления, накопления, страховые выплаты, безвозмездные субсидии и ассигнования из бюджетов и фондов разных уровней, паевые взносы, средства от эмиссии долевых ценных бумаг), а также собственный капитал.

Заемные: различные по форме и видам кредиты и займы (в том числе – облигационные займы, средства от эмиссии векселей и т. д.).

Эффективная подготовка и реализация ИП предполагают необходимость составления инвестиционного бизнес-плана, который в современных условиях призван выполнять, по крайней мере, две функции.

Первая – функция стратегического планирования в условиях рынка. Иными словами, бизнес-план какого-либо ИП есть элемент планирования развития реципиента.

Вторая функция состоит в привлечении инвестиций со стороны внешних инвесторов – потенциальных кредиторов и партнеров: банков, покупателей будущей продукции или услуг реципиента, поставщиков материалов и оборудования, заинтересованных в расширении рынков сбыта, индивидуальных инвесторов и других.

В целом создание и реализация ИП – это многоэтапный процесс, начинающийся с формирования инвестиционного замысла и заканчивающийся выводением объектов инвестирования на проектную мощность. Бизнес-план в этом процессе включает главным образом этапы формирования инвестиционного замысла и предпроектного исследования инвестиционных возможностей. Для потенциального инвестора он фактически выполняет роль инвестиционного предложения и служит основанием для принятия решения о финансировании работ по



подготовке ТЭО (технико-экономического обоснования) проекта, проведению его экспертизы и утверждению. Затем следует принятие инвестиционного решения – вложение средств в реализацию ИП. Результатом работы над бизнес-планом должны быть ответы на основные интересующие инвестора вопросы: сколько всего понадобится средств на воплощение предлагаемого проекта, когда и в каком объеме они будут нужны, как планируется их использование, каковы общепринятые в международной практике прогнозируемые показатели эффективности, каков риск потери вкладываемых средств?

Объем и структура бизнес-плана (равно как и количество этапов в реализации ИП) зависят от масштабов проекта и от цели составления плана. Внутренний бизнес-план (для внутрифирменного планирования) не регламентируется ни по объему, ни по структуре разделов. Бизнес-план, представляемый с целью получения инвестиций, должен удовлетворять требованиям европейского и российского образца. Существуют специальные формы, соответствующие стандартам GAAP (Generally Accepted Accounting Principles), для ввода данных по инвестиционным проектам в международную информационную сеть центров ЮНИДО.

Укрупненная примерная структура бизнес-плана:

- оглавление;
- введение;
- описание компании и ее стратегических целей;
- продукция и услуги;
- анализ рынков сбыта и план маркетинга;
- производственный раздел;
- управление фирмой (проектом);
- юридические аспекты;
- финансовый раздел;
- приложения.

Непосредственно инвестиционный анализ конкретного ИП, ради продвижения которого и подготавливается соответствующий бизнес-план, включает в себя ряд взаимосвязанных пунктов.

Прежде всего должна быть сформулирована идея ИП, характеризующая направление вложений инвестиций. Она дополняется инновационным, патентным, экологическим анализом технических решений в составе намечаемого ИП. Предусматриваются также проверка необхо-





димости выполнения сертификационных требований и проведение предварительного согласования инвестиционного замысла с федеральными, региональными и отраслевыми приоритетами.

Следующим важным этапом является генерирование и описание в какой-либо форме предполагаемого множества альтернативных вариантов ИП, различающихся между собой периодом инвестирования и эксплуатации объектов, составом, объемами и распределением во времени инвестиций, организационно-экономическим механизмом реализации ИП, уровнями инвестиционных рисков и т. д.

Далее приводятся сведения о предполагаемом объеме инвестиций и планируемых источниках их образования. Прогнозируются денежные потоки и определяются их текущие стоимости по вариантам ИП.

Необходимым этапом процесса планирования инвестиций является расчет их эффективности с использованием известных общепринятых критериев, проведение ситуационного анализа чувствительности критериальных показателей и в итоге – оценка рисков осуществления проекта. Заметим, что множество альтернативных вариантов ИП, динамическая модель связанных с ними денежных потоков и критерии эффективности инвестиционных вложений формируют в совокупности задачу выбора наиболее рациональных вариантов ИП.

Большое значение для инвестора имеет информация об условиях возмещения его затрат. В ней указываются способы и сроки возврата инвестиций.

Наиболее часто применяется их возврат в денежной форме в виде погашения ранее полученной, как правило банковской, ссуды. Тогда в плане приводятся данные о предполагаемой процентной ставке за пользование инвестициями и даты начала и окончания выплат. Для компании-реципиента существует несколько принципиальных возможностей погашения долга: из доходов от продажи своей продукции и услуг, через реализацию активов, дополнительную эмиссию ценных бумаг, путем получения ссуды у другого кредитора. Использование двух последних возможностей крайне нежелательно, так как свидетельствует о неустойчивом финансовом положении фирмы, а из двух первых предпочтительнее возмещение займа из доходов, поскольку в случае перехода активов кредитору-банку он будет вынужден нести расходы по управлению ими: выходить на товарные и фондовые рынки, обеспечивать рекламу, оплачивать услуги посредников и пр.



Другой способ возмещения затрат – это предоставление инвестору права собственности на часть продукции, которая будет производиться после реализации проекта. При этом способе в плане должны быть приведены сведения о доле и объеме продукции, которая будет принадлежать инвестору в период возврата инвестиций.

Третий способ предполагает, что инвестору может быть предоставлено право на совместное владение, распоряжение и пользование созданными объектами. В этом случае указывается доля инвестора в акционерном капитале, выручке от продаж, прибыли от реализации.

В заключение следует указать на возможные гарантии для возмещения затрат при нарушении условий осуществления ИП. Это могут быть гарантии в виде залога недвижимости, страхования инвестиций, поручительства местных органов власти и т. д.

### **5.1.2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ [213, 218, 219].**

#### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ (КРИТЕРИИ) ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Эффективность ИП характеризуется соотношением затрат и результатов применительно к интересам его участников.

Различают эффективность проекта как такового и участия в нем отдельных лиц с учетом их вкладов. Выделяют также:

- коммерческую (финансовую) эффективность ИП, отражающую финансовые последствия реализации проекта, прежде всего для его непосредственных участников;
- бюджетную эффективность, учитывающую влияние осуществления проекта на доходы и расходы соответствующего (федерального, регионального или местного) бюджета;
- экономическую (народнохозяйственную) эффективность ИП – эффективность с точки зрения интересов всего народного хозяйства в целом, его отраслей или субъектов Федерации.

Оценка предстоящих затрат и предполагаемых результатов при определении эффективности ИП производится в пределах расчетного периода (горизонта расчетов), продолжительность которого принимается с учетом:

- продолжительности создания (инвестирования), эксплуатации и ликвидации объектов, включенных в ИП;



- средневзвешенного нормативного срока службы используемого основного технологического оборудования;
- срока жизни проекта – периода, в течение которого инвестиции генерируют приток денежных средств;
- достижения заданных значений результирующих показателей ИП;
- требований инвестора.

Следует сказать, однако, что увеличение расчетного периода делает все более ненадежным процесс прогнозирования технико-экономических параметров ИП.

Горизонт расчетов измеряется количеством шагов (периодов начисления доходов). Шаг при этом обычно может быть равен месяцу, кварталу или году.

Затраты, которые несут участники, подразделяются на инвестиционные (капиталовложения), текущие (эксплуатационные) и ликвидационные соответственно фазам формирования и воспроизводства, функционирования и ликвидации объектов инвестирования.

Для стоимостной оценки результатов и затрат можно использовать базисные, мировые, прогнозные (текущие) и расчетные цены. Под базисными понимаются цены, сложившиеся на определенный момент времени и неизменяемые в течение всего расчетного периода. Расчетные цены – это цены, очищенные от инфляции и получаемые из прогнозных введением дефлирующего множителя, соответствующего индексу общей инфляции. Заметим, что при разработке и сравнении нескольких вариантов ИП важно учитывать влияние изменения объемов продаж на рыночную цену продукции и цены потребляемых ресурсов.

Сравнение различных вариантов ИП и выбор лучшего из них осуществляются с использованием системы показателей, которые можно разбить на две группы по тому, учитывают ли они фактор времени с помощью дисконтирования или нет. В практике инвестиционного анализа преобладают дисконтные методы и соответствующий набор показателей, базовыми из которых считаются:

- чистая приведенная стоимость (ЧПС или NPV);
- срок окупаемости ( $T_{\text{ок}}$ , PP);
- внутренняя норма доходности (ВНД или IRR);
- рентабельность, или индекс доходности (ИД, PI).



Дисконтные методы основаны на приведении (дисконтировании) разновременных платежей и поступлений (будущих стоимостей) к некоторому фиксированному моменту времени  $t_0$  (чаще всего принимается  $t_0 = 0$ ). Инструментом приведения является норма дисконта  $E$ , называемая также требуемым уровнем (нормой) доходности, ставкой сравнения или «барьерной» ставкой. Она олицетворяет собой приемлемый для инвестора процент возврата на инвестируемый капитал за определенный период начисления:

$$v^t = \frac{1}{(1 + E)^t} = (1 + E)^{-t}. \quad (5.1)$$

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ИНВЕСТИЦИОННОГО АНАЛИЗА

Анализ инвестиционной эффективности проектов основывается на анализе дисконтированных денежных потоков, обусловленных проектом.

**Денежные потоки** (Cash Flows) – изменение денежных потоков, обусловленных проектом:

$$CF = CI - CO, \quad (5.2)$$

где  $CF$  – изменение денежных потоков, обусловленных проектом;  $CI$  – денежные поступления, обусловленные проектом;  $CO$  – денежные оттоки, обусловленные проектом.

**Дисконтирование** – это приведение к базисному моменту времени затрат, результатов и эффектов от осуществления проекта  $B_t$ , имеющих место на  $t$ -м шаге расчета, выполняется путем их умножения на соответствующий коэффициент дисконтирования  $\alpha_t$ , вычисляемый по следующей формуле:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1 + E)^t}, \quad (5.3)$$

где коэффициент  $\alpha_t$  определяется как

$$B_0 = B_t \alpha_t. \quad (5.4)$$



**Ставка дисконтирования**  $E$  (норма дисконтирования) – минимально допустимая для инвестора величина дохода в расчёте на единицу авансированного капитала. Возникает в связи с тем, что ценность эквивалентных денежных средств, получаемых в разные моменты времени, неодинакова.

**Текущая стоимость** – величина денежных средств в начальный момент времени, т. е. на момент инвестиций.

### ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА

**Срок окупаемости** (PB), рассчитываемый как простое отношение годового экономического эффекта  $B_0$  к капиталовложениям  $I_0$  ( $B_0 = R_0 - Z_0$ ),

$$PB = \frac{I_0}{B_0} \quad (5.5)$$

может служить в качестве первой самой грубой оценки рентабельности проекта. Следует иметь в виду, что получаемое значение оказывается сильно заниженным и не отражает развития проекта по истечении срока окупаемости и позволяет оценить ожидаемую прибыль.

**Чистый дисконтированный доход** (NPV) – превышение интегральных (за расчетный период времени) дисконтированных результатов над интегральными дисконтированными затратами, обусловленными реализацией инвестиционного проекта:

$$NPV = \sum_t (R_t - Z_t) \alpha_t - I_0, \quad (5.6)$$

где  $R_t$  – финансовый результат на  $t$ -м шаге;  $Z_t$  – затраты на  $t$ -м шаге за исключением капиталовложений (в частности, эксплуатационные затраты);  $I_0$  – сумма дисконтированных (если они распределены во времени) капиталовложений.

Рассматриваемый проект может быть признан экономически эффективным, если интегральный эффект положителен ( $NPV > 0$ ). При сравнении вариантов осуществления инвестиционных проектов с одинаковым горизонтом следует руководствоваться критерием максимума интегрального экономического эффекта ( $NPV \rightarrow \max$ ).



К недостаткам рассмотренного показателя интегрального экономического эффекта обычно относят то обстоятельство, что он не показывает точной прибыльности проекта и сложен для понимания предпринимателей, привыкших принимать инвестиционные решения по величине отдачи на единицу авансированного капитала. Ниже приведен график (рис. 5.1) изменения величины чистого дисконтированного дохода со временем для следующих условий: среднегодовой эффект  $(R - Z) = 1200$ , капиталовложения  $I_0 = 3000$ , норма дисконтирования  $E = 0,18$ , расчетный период  $T_p = 5$  лет.

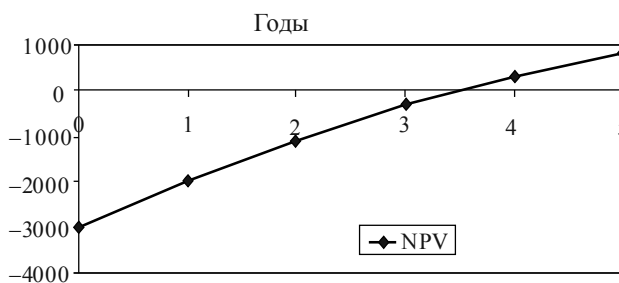


Рис. 5.1. Изменения величины чистого дисконтированного дохода со временем

**Индекс прибыльности (доходности) инвестиций** – отношение интегральных дисконтированных доходов к интегральным дисконтированным капиталовложениям:

$$PI = \frac{\sum (R_t - Z_t) \alpha_t}{I_0}. \quad (5.7)$$

Для экономически эффективных проектов должно соблюдаться условие  $PI > 1$ .

*К достоинствам рассматриваемого показателя, как правило, относят возможность его использования в качестве меры устойчивости проекта.*

Индекс прибыльности инвестиций связан с чистым дисконтированным доходом: если чистый дисконтированный доход положителен ( $NPV > 0$ ), то условие  $PI > 1$  выполнено, и наоборот.



**Внутренняя норма прибыли IRR** (синонимы: внутренняя норма рентабельности, внутренняя норма доходности) – норма дисконтированная, обращающая в нуль величину интегрального экономического эффекта (или обеспечивающая равенство интегральных дисконтированных капиталовложений и доходов). Графическая интерпретация представлена на рис. 5.2.

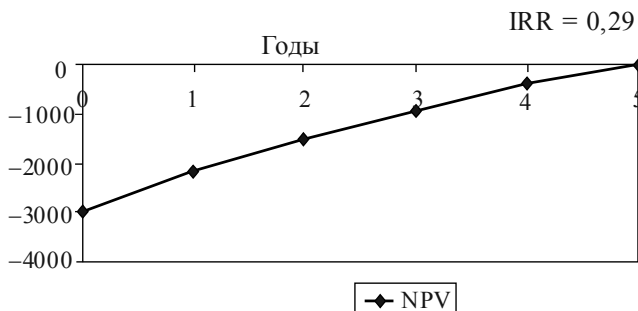


Рис. 5.2. Внутренняя норма прибыли IRR

*Если определенная величина внутренней нормы прибыли превышает требуемую инвестором минимально допустимую норму дохода на вложенный капитал, то реализация проекта признается целесообразной.*

**Время выплаты (РО)** (синоним – период возмещения) – минимальный период времени, в течение которого интегральный экономический эффект становится положительным (или интегральные дисконтированные капиталовложения возмещаются интегральными дисконтированными доходами от реализации проекта).

Графическая интерпретация методики определения периода возмещения представлена на рис. 5.3.

Для экономически эффективных проектов должно выполняться условие  $РО < T_p$ , т. е. капиталовложения должны окупаться в пределах установленного расчетного периода.

**Отчет о движении наличности (Cashflow)** включает в себя временной график баланса наличности по проекту и временной график накопленной прибыли. Представляется в виде таблицы или графика.



Рассчитывается движение наличности следующим образом:

$$CF_t = R_t - Z_t - T_t + CF_{t-1}, \quad (5.8)$$

где  $R_t$  – поступления на шаге  $t$ ;  $Z_t$  – расходы на шаге  $t$ ;  $T_t$  – выплата налогов на шаге  $t$ .

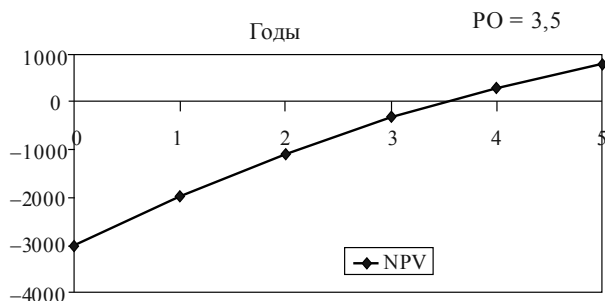


Рис. 5.3. Графическая интерпретация методики определения периода возмещения

**Использование программных средств для анализа эффективности инвестиций.** Расчет движения наличности и интегральных показателей эффективности инвестиций для реальных проектов оказывается задачей достаточно трудоемкой, в связи с чем для этого широко используется различное программное обеспечение. В частности, такие расчеты можно проводить в системе электронных таблиц MS Excel, с помощью пакета Project Expert.

## ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

### Срок окупаемости (PayBack)

$$PB = \frac{I_0}{B_0},$$

где  $B_0$  – годовой экономический эффект ( $B_0 = R_0 - Z_0$ );  $I_0$  – капиталовложения.

Достоинства показателя:

- простота расчета;
- наглядность единиц (годы);





- не требует предположений относительно процентной ставки и срока эксплуатации.

Недостатки:

- использование этого показателя может привести к заниженной оценке объема необходимых инвестиций;
- не учитывает дисконтирования;
- не учитывает развития проекта за рамками срока окупаемости.

### **Интегральный экономический эффект $\mathcal{E}_m$ , или чистый дисконтированный доход (NetPresentValue)**

*Дисконтированная стоимость*

$$B_0 = \frac{B_n}{(1+r)^n}.$$

**Внутренняя норма прибыли (IRR).** Для определения внутренней нормы прибыли рассматриваемых проектов воспользуемся таблицей аннуитета и предположим, что прибыль в процессе эксплуатации одинакова по годам (либо рассчитываем аннуитет в соответствии с рекомендациями [212, 213]). При этом используется коэффициент аннуитета

$f = \frac{B}{I_0}$ , где  $(B = R - Z)$  – годовой экономический эффект.

Изложенные выше основы методики оценки технико-экономической эффективности инвестиционных проектов достаточны только для первого приближения при ранжировании (рандомизации) рассмотренных возможных вариантов одного и того же проекта и выбора предположительного варианта.

Однако рыночные отношения, будучи по своей природе одними из самых сложных экономических отношений, поскольку включают в себя пресловутый человеческий фактор, должны учитывать вероятностный характер исходной информации и иерархическую структуру самого объекта, для которого разрабатывается инновационный проект. Объект исследований имеет как горизонтальные, так и вертикальные системные связи с окружением и является подсистемой другой, более высокой теплоэнергетической системы.



В связи с этим при более тщательном исследовании инновационного бизнес-проекта необходимо учитывать характер отношений (и способность определения этих отношений), указанных ниже.

### **КОММЕРЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ**

Из определения эффективности ИП следует, что для конструирования характеризующих ее показателей необходимо идентифицировать затраты и правильно выбрать показатель эффекта (результата). Обычно эффект деятельности коммерческого предприятия оценивается объемом продаж, а также размером получаемой прибыли – балансовой или чистой.

### **БЮДЖЕТНАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ**

Основным показателем, используемым для обоснования предусмотренных в ИП мер федеральной или региональной бюджетной финансовой поддержки рассматриваемого инвестиционного проекта, является бюджетный эффект. Бюджетный эффект  $БЭ_t$  для  $t$ -го шага осуществления ИП определяется как превышение доходов соответствующего бюджета  $ДБ_t$  над его расходами  $РБ_t$  в связи с реализацией данного проекта:

$$БЭ_t = ДБ_t - РБ_t.$$

Интегральный бюджетный эффект  $БЭ_{\text{инт}}$  рассчитывается как сумма дисконтированных пошаговых бюджетных эффектов или как превышение интегральных бюджетных доходов  $ДБ_{\text{инт}}$  над интегральными бюджетными расходами  $РБ_{\text{инт}}$ .

### **УЧЕТ ИНФЛЯЦИИ И ФАКТОРОВ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ [212, 213]**

Для стоимостной оценки затрат и результатов в критериях эффективности инвестиционных вложений, описанных в предыдущем разделе, чаще всего могут быть использованы расчетные либо прогнозные (текущие) цены. Главным при учете инфляции в расчетах эффективности является обеспечение согласованности инфляционной корректировки денежных потоков с корректировкой средневзвешенной стоимости капитала или нормы дисконта на индекс инфляции. Если стоимостная оценка параметров, влияющих на денежные потоки сравни-



ваемых ИП, производится в расчетных ценах, то норма дисконта должна быть реальной, т. е. представлять собой номинальную ставку за вычетом ожидаемых темпов инфляции. Если же норматив приведения берется номинально и уже включает в себя, таким образом, инфляционную премию, то и денежные потоки должны оцениваться в прогнозных значениях.

### ПРОВЕРКА ИП НА УСТОЙЧИВОСТЬ

Осуществляется разработка сценариев реализации проекта в условиях наиболее вероятных и наиболее неблагоприятных для его участников. По каждому сценарию исследуются действия организационно-экономического механизма реализации ИП, способы маневрирования при различных возмущениях и сбоях.

Проект считается устойчивым, если возможные неблагоприятные ситуации устраняются за счет компенсирующих способностей организационно-экономического механизма (наличия резервов, другого рода избыточности, возможностей выплат страхового возмещения) и не приводят в результате к существенным деформациям интересов его участников и потере эффективности.

Естественно, что повышение потенциальной адаптивности проекта (варианта проекта) требует привлечения дополнительных затрат, подлежащих обязательному учету.

### КОРРЕКТИРОВКА ПАРАМЕТРОВ ИП, ИЛИ НОРМЫ ДИСКОНТА

Возможная неопределенность условий осуществления проекта может учитываться корректировкой его параметров – заменой проектных значений на ожидаемые. Например, сроки строительства и выполнения других работ увеличиваются на среднюю величину возможных задержек, завышается стоимость СМР, сдвигаются плановые сроки денежных поступлений и т. д.

Риск, сопровождающий реализацию того или иного варианта инвестиционного проекта, может быть эквивалентирован увеличением нормы дисконта по данному варианту с использованием следующей формулы:

$$\begin{array}{lcl} \text{Требуемый уровень} & \text{Минимально привлека-} & \text{Страховая премия} \\ \text{доходности по } k\text{-му} & \text{тельная и свободная} & \text{по } k\text{-му варианту ИП} \\ \text{варианту ИП} & \text{от риска ставка} & \text{(премия за риск)} \end{array} = +$$



### **ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕАЛИЗАЦИИ ИП**

Выполняется формализованное описание множества возможных условий реализации проекта (вариантов проекта) и отвечающих им показателей затрат, результатов и эффективности. Кроме того, в ходе расчетов получают количественное представление неоднозначных исходных данных, причем неопределенность условий не считается неизменной. По мере осуществления проекта участникам поступает дополнительная информация и ранее существовавшая неопределенность корректируется.

Далее на построенной модели в рамках определенных статистических процедур выполняются имитационные эксперименты с целью получения статистических оценок (математического ожидания, дисперсии и других) различных параметров и показателей эффективности по вариантам ИП. Указанные оценки и составляют информационную основу для принятия решения о выборе того или иного варианта.

### **ИНСТРУМЕНТЫ ИНВЕСТИЦИОННОГО АНАЛИЗА**

Разработка бизнес-планов реальных ИП в соответствии с международными требованиями и моделирование различных вариантов их реализации при помощи калькулятора практически невозможны. Это тем более верно в отношении эффективного планирования инвестиционной деятельности крупных промышленно-финансовых структур. Для решения подобного рода задач в настоящее время на российском рынке компьютерного программного обеспечения имеются специализированные программные комплексы как зарубежного (COMFAR, PROPSPIN), так и отечественного производства с различными функциональными возможностями, но основанные на принципах и подходах методики ЮНИДО. Последние представляют наибольший интерес, поскольку разработаны с учетом специфики России. Из их числа к наиболее известным можно отнести следующие.

Программный продукт Projekt Expert For Windows, разработанный московской фирмой «Про-инвест консалтинг», является довольно известным и хорошо тиражируемым в своем секторе рынка. Он сочетает методы сетевого планирования, предполагающие задание структуры проекта в виде взаимосвязанной последовательности работ, с динамической имитационной моделью денежных потоков и методикой прове-



дения расчетов эффективности инвестиций. Предусмотрена автоматическая корректировка всех денежных поступлений и платежей в соответствии с прогнозируемыми индексами инфляции на каждый шаг расчетного периода.

Существует специальная версия указанного продукта – Biz Planner 4.2, предназначенная для использования промышленными предприятиями независимо от их отраслевой принадлежности. Возможности этой программы позволяют пользователю сформировать модель действующего на рынке предприятия, адекватно отражающую его операционную деятельность. Все прогнозируемые поступления и платежи могут быть описаны таким образом, что фактически будут показывать платежные операции реального объекта в окружающем экономическом пространстве.

Аналогичным по уровню и назначению программным продуктом является пакет «Альт-Инвест» фирмы «Альт» (г. Санкт-Петербург). В силу прозрачности используемых алгоритмов и формул этот пакет лучше других приспособлен для целей обучения.

Соответствующее возможностям место среди программных разработок своего класса занимает и программный комплекс «Инвестор» фирмы «ИНЭКС» (г. Москва). Это – многофункциональная программная среда, ориентированная на решение широкой гаммы задач финансового, экономического, инвестиционного анализа и планирования и претендующая в силу этого на роль универсального инструмента финансового аналитика.

### **5.1.3. ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ [221, 220]**

Оценка инвестиционных проектов строительства, расширения, реконструкции или технического перевооружения теплоэнергетических объектов определяется технологическими особенностями этих объектов, а также системной спецификой совместной работы объектов теплоэнергетической отрасли. К этим системным особенностям теплоэнергетики относятся следующие.

1. Непрерывность и одновременность процессов производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии и теплоэнергии. Это дополняется практической невозможностью мгновенно аккумуляли-



ровать электроэнергию и теплоэнергию в масштабах крупных энергообъединений. В результате в каждый момент времени должен соблюдаться жесткий баланс производства и потребления энергии с учетом потерь в пределах каждой замкнутой в энергетическом смысле технологической системы. Из этой особенности вытекают:

- высокие требования к планированию потребности теплоэнергии и оперативному урегулированию (диспетчеризации) режимов работы энергосистем во избежание ее дефицита или, наоборот, излишних резервов мощности;
- требования к энергетическим предприятиям и их объединениям в каждый момент реального времени обеспечить готовность покрытия нагрузки, которая необходима потребителям, в частности, в периоды максимума и минимума нагрузки, прохождение которых связано с большими трудностями и, как правило, требует общесистемных усилий.

2. Сильная технологическая зависимость функционирования и эффективной работы всех отраслей экономики страны от бесперебойного и полного удовлетворения их потребностей в энергии. При этом сроки сооружения энергообъектов обычно выше, чем у объектов – потребителей энергии. Это предопределяет необходимость в ряде случаев заблаговременно сооружать энергообъекты под ожидаемые (прогнозируемые) объемы потребления энергии и мощности. Отсюда вытекают требования:

- максимальной надежности в работе энергетических предприятий и их объединений;
- обеспечения достаточных резервов мощности на теплоэлектростанциях и энергосистемах при широкой оперативной взаимопомощи между ними для предотвращения аварийного отключения потребителей;
- наличия резервных связей в электро- и теплосетях и резервов пропускной способности для многостороннего питания потребителей;
- рациональной заблаговременности создания энергетической базы или опережающего развития энергетики по сравнению с ростом потребности в энергии у потребителей вследствие, как правило, более высокой длительности сооружения энергообъектов.

3. Высокая частота протекания процессов, отсюда повышенные требования к автоматизации управления энергетическими установками.



Эти требования связаны с параллельной работой генерирующего оборудования всех теплоэнергоустановок в каждый момент времени синхронно по параметрам энергоносителей в масштабах теплоэнергетической системы предприятия. Такая особенность характеризует требования:

- максимальной автоматизации процессов управления энергетическим производством, распределением и передачей энергии, включая использование противоаварийной автоматики;
- рассмотрения каждого энергообъекта как составного элемента общесистемного единого процесса производства, распределения и потребления энергии.

4. Непосредственное соединение между собой всех агрегатов энергосистемы, обеспечивающих ее технологическое единство, с помощью тепловых и электрических сетей и вытекающая отсюда опасность практически мгновенного развития и распространения каждой аварии с возникновением большого ущерба для экономики региона или страны. Отсюда жесткие требования:

- к максимальной безотказности всех типов оборудования энергосистемы и каждого вновь вводимого ее элемента;
- к стабильности параметров качества тепловой и электроэнергии, таких как температура и давление пара, частота и напряжение переменного тока, и их допустимому изменению в очень узких пределах у потребителей и в отдельных точках энергетической сети.

5. Переменный режим нагрузки энергетических предприятий в суточном, недельном, месячном и годовом разрезах, вызванный неопределенностью процессов включения, отключения и изменения режимов работы отдельных потребителей. Эта особенность вызывает необходимость:

- высокой маневренности энергетических блоков и агрегатов или их части в общей структуре мощностей;
- приемлемой экономической работы маневренного оборудования в переменных режимах;
- эффективного участия отдельных типов теплоэнергоустановок в покрытии графиков нагрузки энергосистемы для снижения издержек ее эксплуатации в целом;
- создания условий с помощью автоматических систем регулирования для максимально надежной работы энергосистем и поддержания требуемого качества энергии в условиях переменного режима.



Отмеченные особенности теплоэнергетики промпредприятия, города в совокупности характеризуют ее как единую крупную систему с единым непрерывным производством теплоэнергии, работающим синхронизированно с другими энергетическими системами при наличии и использовании горизонтальных и вертикальных связей, включающую в себя как подсистему добычу, переработку и транспорт топлива. Эти особенности требуют рассмотрения инвестиционных проектов в теплоэнергетике одновременно с двух позиций: общесистемных – как элемента единой системы и индивидуальных – как самостоятельного конкурентоспособного проекта. Кроме того, энергообъекты осуществляют в процессе эксплуатации две функции: производственно-распределительную и резервную по обеспечению мгновенных изменений в потреблении энергии и взаимопомощи в аварийных ситуациях.

Теплоэнергетические системы, несмотря на их локальный характер, могут участвовать как игроки на региональных или агломерационных районных рынках энергии и мощности, что включает их, таким образом, в конкурентную борьбу за потребителей.

## **5.2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАМЕЩЕНИЯ МАЗУТА ИСКУССТВЕННЫМ КОМПОЗИЦИОННЫМ ЖИДКИМ ТОПЛИВОМ [221]**

Наиболее простым и в то же время эффективным инновационным проектом является замещение дорогого жидкого топлива в отопительно-производственной установке дешевым ИКЖТ.

Все приведенные ниже примеры технико-экономических расчетов основаны на реальных проектах модернизации функционирующих энергетических объектов. Период, в течение которого рассматривались объекты модернизации, охватывает 2003 – 2008 гг. Это время характеризуется ростом стоимости углеводородных топлив, соответственно повышением товарных цен на другие виды топлива, в частности на уголь, на изделия машиностроения и на транспортные расходы. Резко отличались по величине при этом цены на однотипные изделия и ресурсы для разных регионов, и это касается также оплаты труда, чем и объясняются различия в абсолютных показателях в этих примерах.





Ниже представлен технико-экономический расчет для проекта модернизации производственной-отопительной котельной Тепловозоремонтного завода в г. Павлодаре (Республика Казахстан). Проект разработан в соответствии с методикой расчета эффективности инновационных проектов (см. раздел 5.1).

### **5.2.1. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА МОДЕРНИЗАЦИИ ОП – КОТЕЛЬНОЙ ЗАВОДА ТЕПЛОВОЗОРЕМОНТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, г. ПАВЛОДАР**

В связи с увеличением стоимости мазута до 220 долл. США за 1 тонну возникла необходимость перевода котельной АО «Алга А» на сжигание угля. При этом со стороны «Заказчика» обозначилось намерение использовать наиболее современные разработки по сжиганию твердого топлива с учетом того, что:

- котельная находится в центральной части г. Павлодара и территория котельной не позволяет разместить на ней открытый угольный склад и золошлаковые отвалы;
- затраты при замене газомазутных котлов на твердотопливные высокие.

Наиболее приемлемым вариантом представляется перевод газомазутных котлов котельной на сжигание искусственного композиционного жидкого топлива (далее ИКЖТ), полученного из углей Экибастузского и/или Майкубенского угольных месторождений. Перевод не требует изменений конструкции котлов.

ООО «Росток» на базе научных разработок технологии производства ИКЖТ, выполненных в Лаборатории проблем теплоэнергетики НГТУ, разработало технологическую линию для производства нового топлива. Был также рассмотрен способ сжигания ИКЖТ в котельных агрегатах в адиабатическом предтопке, где топливо полностью сгорало с минимальными потерями и с низкими показателями вредных выбросов в продуктах сгорания. Адиабатический предтопок, способы подачи водоугольного топлива, горелки, управление процессом сгорания, форсунки являются разработкой ФГПУ «Экотехника» (г. Новокузнецк). Эта технология опробована на практике и успешно используется в некоторых проектах.



Для фильтрации газообразных продуктов сгорания было предложено использовать систему рукавных фильтров с пневмоудалением золы.

Все эти вопросы были предварительно обсуждены на технических совещаниях, и результаты этих обсуждений суммированы в таблицах исходных данных (табл. 5.1).

Таблица 5.1

**Количество вредных веществ, образующихся при сжигании различных видов топлива**

| Вредное вещество в выбросах         | Уголь     | Мазут     | ВУТ, ИКЖТ               |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-------------------------|
| Пыль, сажа, г/м <sup>3</sup>        | 100...200 | 2...5     | 1...5, сажа отсутствует |
| SO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup> | 400...800 | 400...700 | 200...300               |
| NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup> | 250...600 | 150...750 | 100...200               |

**Исходные данные**

- Мазут Чимкентского нефтеперерабатывающего завода  
Теплотворная способность  $Q_H$  .....9500 ккал/кг  
Цена за 1 тонну «франко-бункер» ..... 180 долл. США
- Уголь бурый (Б-3) Сарыкольского или Майкюбенского разрезов РК  
Теплотворная способность  $Q_H$  .....4250 ккал/кг  
Цена за 1 тонну ..... 16 долл. США

**Искусственные топлива**

- ИКЖТ состава: уголь 0,45; отходы нефти или мазут 0,1; вода 0,45.
- ВУТ состава: уголь 0,5; вода 0,5.

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ МАЗУТА НА ИСКУССТВЕННОЕ КОМПОЗИЦИОННОЕ ЖИДКОЕ ТОПЛИВО (ИКЖТ)**

Исходные данные и расчет стоимости производства тепловой энергии на их основе сведены в табл. 5.2.



Таблица 5.2

## Технические и экономические характеристики топлив

| № п/п | Компоненты и характеристики топлив | Мазут | ИКЖТ «Б»                     | ВУТ*                  |
|-------|------------------------------------|-------|------------------------------|-----------------------|
| 1     | Уголь, кг/кг                       | –     | 0,45                         | 0,5                   |
| 2     | Мазут, нефть, отходы нефти, кг/кг  | 1,0   | 0,10                         | –                     |
| 3     | Вода, кг/кг                        | –     | 0,45                         | 0,5                   |
| 4     | Калорийность $Q_H$ , ккал/кг       | 9500  | 3381                         | 2125                  |
| 5     | Стоимость, долл/т                  | 180   | \$8 + \$18 +<br>+ \$4 = \$30 | \$8 + \$3 =<br>= \$11 |

\*ВУТ – водоугольное топливо.

При расчетах в табл. 5.2 было принято: цена на нефть, мазут, отработку или отходы нефти одинакова и равна 180 долл/тонна.

По своим техническим характеристикам ИКЖТ используется на разогретом котле от температуры +800 до +1200 °С.

В данном случае работают два котла с общей производительностью по пару 20 т/ч (4,58 кг/с).

Отопительный сезон по климатическим условиям Павлодара считать 160 суток.

Расчетная тепловая мощность котлов составляет 15,217 мВт.

Тогда расход мазута будет 0,383 кг/с, 1378,8 кг/ч, или 33,09 т/сут., или 5294,6 т/сезон.

**Фактический расход мазута составил** 0,302 кг/с, 1086,7 кг/ч, или 26,08 т/сут., или 4173 т/сезон.

Сезонный коэффициент загрузки котлов  $K = 0,9$ , что соответствует нормальной загрузке котлов в отопительном сезоне.

Рассчитаем расход ИКЖТ за сезон.

Теплота сгорания ИКЖТ составляет 3381 ккал/кг.

Теплота сгорания мазута составляет 9500 ккал/кг.

Тогда для замены 1 т мазута потребуется 2,8 т ИКЖТ.



Таким образом:

- расход ИКЖТ за сезон при замене мазута в количестве 5294,6 т/сезон составит 14 825 т;
- расход ИКЖТ за сезон при замене мазута в количестве 4173 т/сезон составит 11684,4 т.

### **5.2.2. ОПИСАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕГО В АО «АЛГА А» ОБОРУДОВАНИЯ**

Котельная АО «Алга А» работает на мазуте и оборудована двумя котлами производительностью 10 т пара/ч марки КЕ-10-14 МГ (ст. № 1) и ДКВР-10/13 (ст. № 2) и двумя котлами производительностью 6,5 т пара/ч марки ДЕ-6,5-14 ГМ (ст. № 3 и 4). Котлы производительностью 10 т/ч оснащены дутьевыми вентиляторами типа ВДН-11,2У, дымососами Д-12,5 и чугунными ребристыми экономайзерами системы ВТИ. Котлы производительностью 6,5 т/ч оснащены дутьевыми вентиляторами типа ВДН-9, дымососами ДН-10 и экономайзерами. На одном котле экономайзер стальной типа БВЭС-III-2, на другом – чугунный типа ЭБ1-3304. Котлы работают на одну кирпичную трубу высотой 40 м. Наладочных работ на котлах не производилось. По косвенным причинам (ограничение по тяге на нагрузках, близких к максимальным) можно предположить, что на котлах производительностью 10 т/ч повышенные присосы.

Для первичного измельчения исходного угля и гомогенизации твердой и жидкой фазы ИКЖТ у ТОО «Гамма» в г. Экибастузе имеется молотковая дробилка типа МД-50 и реактор-смеситель РС-6.

### **5.2.3. ВЫБОР СОСТАВА ИКЖТ**

Для получения ИКЖТ «Заказчиком» было предложено два вида углей: экибастузский каменный уголь марки КСНР и бурый уголь разреза Сарыкольский марки Б-3, примерно одинаковой калорийности – 4050...4350 ккал/кг (среднее 4200) и 4000...4500 ккал/кг (среднее 4250) соответственно, но с большой разницей по зольности и влажности. Так, для каменного угля зольность и влажность на рабочую массу составляют  $A = 36,6 \%$  и  $W = 5 \%$ , а для бурого угля  $A = 20 \%$  и  $W = 19,5 \%$  соответственно. В связи с достаточно большой зольностью обоих топлив были проведены расчеты эффективной калорийности



ИКЖТ с различной влажностью, результаты которых приводятся в табл. 5.2.

Как видно из расчета, даже при влажности ИКЖТ  $W = 40\%$  его низшая теплота сгорания будет чуть больше 3000 ккал/кг при использовании бурого угля, что несколько недостаточно при факельном способе сжигания. В связи с этим предлагается использовать бурый уголь с добавлением 10 % мазута, отработки нефтепродуктов или отходов сырой нефти. Как видно из табл. 5.2, такая смесь имеет  $Q_H^p = 3381$  ккал/кг. Расход топлива на один котел производительностью 10 т/ч по максимуму составит 2000 кг/ч (среднее 1870 кг/ч), на котел 6,5 т/ч – 1300 кг/ч (среднее – 1220 кг/ч). Таким образом, общий расход топлива на четыре котла составит по максимуму 6600 кг/ч (среднее – 6180 кг/ч). Реальная эксплуатация котельной даже в зимний период ограничивается одновременной нагрузкой на два котла (при расчетах рассматриваем вариант с котлами КЕ-10-14 МГ № 1 + ДКВР-10/13 № 2), а это значит, что максимальный часовой расход ИКЖТ будет составлять 3800 кг/ч, т. е. 15 мВт. Объем образования золы при работе двух котлов составит по максимуму 470 кг/ч. Для проектирования необходимо ориентироваться на 500 кг/ч. На котлах 10 т/ч установлены вентиляторы ВДН-11,2У, дымососы Д-12,5 и экономайзеры чугунные ребристые системы ВТИ. Ожидаемые максимальные расходы дымовых газов для котлов 10 т/ч – 14 040 м<sup>3</sup>/ч (для расчетного избытка воздуха перед дымососом  $\alpha = 1,2$ ). Реальные суммарные присосы заметно больше, поскольку даже при работе на мазуте достичь максимальной нагрузки не могли из-за нехватки тяги. Определить реальные присосы можно только в процессе наладки котлов. В связи с этим при проектировании следует систему золоудаления рассчитывать на 600 кг/ч, а для котла производительностью 10 т/ч золоуловитель необходимо рассчитывать на 200 кг/ч (для котла 6,5 т/ч соответственно 130 кг/ч).

Для сбора золы от всех работающих котлов необходимо предусмотреть вакуумный пневмотранспорт от рукавных фильтров к золонакопительному бункеру и сам золонакопительный бункер с его разгрузкой один раз в сутки (автомобиль с вакуумной загрузкой типа «цементовоз»).



### 5.3. ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ

По результатам обследования была выявлена целесообразность переоборудования котельной в три этапа.

На *первом этапе* необходимо произвести:

- 1) изыскательские работы для проектирования производственного помещения и склада;
- 2) поставку проектной документации;
- 3) строительство производственного помещения и склада под уголь;
- 4) поставку технологической линии по производству ИКЖТ согласно спецификации № 1 в приложении;
- 5) поставку предтопка и системы золоудаления на котел ДКВР-10/13 № 2;
- 6) монтаж технологической линии производства ИКЖТ;
- 7) шефмонтажные, пусконаладочные работы технологической линии производства ИКЖТ и работы по вводу в эксплуатацию АСУ ТП.

На *втором этапе* необходимо произвести:

- 1) монтаж горелочного устройства системы подачи топлива и системы золоудаления на одном котле ДКВР-10/13 № 2;
- 2) шефмонтажные, пусконаладочные работы горелочного устройства, системы подачи топлива и системы золоудаления на одном котле ДКВР-10/13 № 2.

*Третий этап* должен в себя включать:

- 1) поставку трех горелочных устройств и золоудаления на котел КЕ-10 и двух котлов ДЕ-6,5;
- 2) перенос стены здания котельной для котлов ДЕ-6,5, монтаж горелочных устройств и систем золоудаления трех котлов;
- 3) шефмонтажные, пусконаладочные работы горелочных устройств и системы золоудаления трех котлов, режимная наладка всех четырех котлов.

Кроме того, были протокольно закреплены некоторые предварительные договоры «Заказчика» и «Исполнителя»:

- доставку топлива от угольных разрезов, предварительно измельченного до фракций  $\varnothing \leq 3$  мм, осуществлять в мягких контейнерах типа «МКР» до котельной «Алга-А» (обеспечение экологической безопасности в г. Павлодаре Р.К.);



- размещение производственных площадей для технологической линии с размерами  $9 \times 16$  м при высоте  $h = 9$  м выполнить с устройствами, обеспечивающими пылеулавливание при загрузке линии и при работе дезинтеграторов и мельниц-дробилок предварительного измельчения (экологическая безопасность);
- предусмотреть строительство склада топлива на территории котельной с запасом угля на 10 суток работы котельной и для хранения угля в контейнерах «МКР» с устройствами защиты от пыления при разгрузочных работах;
- улавливание золы обеспечивать рукавными фильтрами типа «ФРИ-180-03-П»;
- поскольку договор носит международный характер и расценки на выполнение работ, а также цены на изделия и материалы могут иметь разное значение в РК, НСО и Московском регионе, цены которого являются определяющими при заключении международных договоров, согласовать цены при составлении окончательного варианта договора.

#### **5.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОЛЬНОГО ОСТАТКА ИКЖТ ИЗ УГЛЕЙ АО «АЛГА-А»**

Предварительные результаты исследований свойств золы, улавливаемой рукавными фильтрами в количестве 99 % при сжигании ИКЖТ из бурого и/или каменного угля или смесью из этих углей, где есть аргиллитовые глины с содержанием  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , определяют эту золу как дорогостоящий и востребованный рынком товарный продукт, учитывающий вяжущие свойства строительных материалов. При применении этого тонкодисперсного активного материала фракции  $\varnothing \sim 1 \dots 20$  мкм, например, в производстве кирпича (при добавках его в количестве 10 % в глинистую смесь) кирпич марки 100 приобретает качественные свойства марки 400 и высокопрочных материалов марки 500.

Большое значение имеет также форма золовых частиц. По своему генезису частички золы должны быть примерно одинаковых размеров ( $\sim 16 \dots 30$  мкм) и представлять собой пористые микросферические образования. В этом случае зола будет идеальным наполнителем для



бетонных изделий в строительных конструкциях. Исследование зольного остатка показало, что микросферы составляют только часть золы, остальная часть – это обломки микросфер. Но и в этом качестве зола ИКЖТ представляет ценный товарный продукт.

Консультации с представителями заводов бетоностроительных конструкций в г. Павлодаре показали, что производители бетона понимают проблему и готовы закупать золу с самовывозом ее от котельной.

Согласно расчетам за отопительный сезон 160 суток сумма прибыли от реализации алюмосиликатных микросфер составит 251 872 USD (6801 тыс. руб.), что экономит затраты по топливной составляющей действующей котельной.

Однако это обстоятельство является предпочтением, возможно реализуемой после окончания модернизации, и в экономических расчетах пока не учитывается.

Была выполнена оценка стоимости перевода газомазутных котлов котельной АО «Алга-А» на сжигание ИКЖТ при неполной загрузке (два котла).

**Итого сметная стоимость строительно-монтажных, шефмонтажных, пусконаладочных и испытательных работ предварительно составляет .....13 149 тыс. руб.**  
**Всего затрат по проекту .....28349,6 тыс. руб.**

#### ВЫВОД ПО РАЗДЕЛАМ 5.1 – 5.4

1. По данным сертификатов каменного и бурого углей, предложенных «Заказчиком» для приготовления ИКЖТ, и проведенным расчетам предлагается использовать бурый уголь Б-3 с добавлением 10 % мазута, отходов сырой нефти или отработки нефтепродуктов. На основе этого разработаны способы производства топлива и его сжигания, а также технологическая линия приготовления, горелочное устройство, обеспечивающее стабильное горение топлива, и устройство по золоудалению. Приведен расчет стоимости оборудования, входящего в технологическую линию по производству и сжиганию топлива, а также золоудалению.

2. Определены размеры и стоимость строительства производственного помещения топливоприготовления и угольного склада.





• резерв средств на непредвиденные работы  
и затраты ..... **1950 тыс. руб.**

(с учетом резервных средств, затрат на самостоятельную закупку оборудования, строительство и монтаж).



Был выполнен уточненный расчет сроков работ и пунктов договора по всем трем этапам его выполнения. Было уточнено расходование средств как по каждому виду работ по всем трем этапам договора, так и по каждому этапу в целом.

Был предусмотрен резерв средств на непредвиденные работы и затраты в сумме 1950 тыс. руб. Оговорены условия расходования резервных средств.

### 5.5. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИП «АЛГА-А» (табл. 5.3 – 5.5)

В качестве исходной информации принято следующее.

1. Полная стоимость проекта с учетом НДС, с разработкой разделов ОВОС – охрана воздействия на окружающую среду, ГО и ЧС – граница безопасности и чрезвычайных ситуаций и согласования проекта в надзорных организациях.

$$Ц_{ИП} = 1\,056\,244 \text{ долл. США.}$$

Расчет производился в привязке к доллару США, поскольку проект выполняется для республики Казахстан.

2. Годовой расход мазута  $B_M = 5294,6 \text{ т}$  по цене 180 долл. США за тонну. Общая цена мазута

$$Ц_M = 953\,028 \text{ долл. США.}$$

3. Годовой расход ИКЖТ  $B_{ИКЖТ} = 14\,825 \text{ т.}$

Т а б л и ц а 5.3

#### Расчет годовых эксплуатационных и текущих затрат на производство ИКЖТ

| № п/п | Наименование       | Единица измерения | Годовая норма расхода                           | Стоимость единицы, долл. | Общая стоимость, долл. |
|-------|--------------------|-------------------|---|--------------------------|------------------------|
| 1     | Материалы для ИКЖТ | т                 | 14 825  | 30*                      | 444 750                |
| 2     | Электроэнергия     | кВт · ч           | $25 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$ | 0,06                     | 22237,5                |
|       | ВСЕГО              |                   |   |                          | 466987,5               |



Таблица 5.4

**Затраты на оплату труда и отчисления на социальные нужды**

| № п/п | Наименование                          | Средняя месячная зарплата, долл. | Количество человек | Годовой фонд оплаты труда, долл. |
|-------|---------------------------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 1     | Оплата труда                          | 150                              | 15                 | 27 000                           |
| 2     | Отчисления на социальные нужды (36 %) |                                  |                    | 9720                             |
|       | ИТОГО                                 |                                  |                    | 36 720                           |

Расчет затрат на электроэнергию произведен с учетом коэффициента одновременной работы всех электродвигателей и с учетом расхода на собственные нужды.

Потребность в кадровом составе определена исходя из принятой технологии и режима работы методом расстановки по рабочим местам с учетом максимального совмещения профессий.

Таблица 5.5

**Годовые эксплуатационные затраты на производство ИКЖТ**

| № п/п | Наименование                   | Единица измерения | Годовые затраты |
|-------|--------------------------------|-------------------|-----------------|
| 1     | Материалы                      | долл.             | 444 750         |
| 2     | Электроэнергия                 | долл.             | 22237,5         |
| 3     | Затраты на оплату труда        | долл.             | 27 000          |
| 4     | Отчисления на социальные нужды | долл.             | 9720            |
| 5     | Прочие затраты                 | долл.             | 5808            |
|       | ИТОГО                          | долл.             | 509515,5        |
| 6     | Амортизационные отчисления     | долл.             | 74623,7         |
|       | ВСЕГО                          | долл.             | 584139,2        |

При определении себестоимости ИКЖТ на данном этапе не учитываем возможный доход от продаж золы как строительного компонента, поскольку этот вопрос недостаточно проработан в плане рынка сбыта. Неучет дополнительного возможного дохода несколько снижает экономические показатели ИП.



Себестоимость 1 т ИКЖТ составляет

$$\Pi_{\text{ИКЖТ}} = \frac{584139,2}{14825} = 39,4 \text{ долл./т.}$$

*Показатели оценки эффективности проекта*

При расчетах принято:

- горизонт расчета – 10 лет;
- норма дисконта  $E = 0,16$ .

Чистая прибыль (экономия)

$$\Pi_{\text{ч}} = O_{\text{р}} - И = 953\,028 - 584139,2 = 368888,8 \text{ долл./год.}$$

Простой срок окупаемости

$$\tau_{\text{ок.п}} = \frac{K}{\Pi_{\text{ч}} + И_{\text{АМ}}} = \frac{1\,056\,244}{368888,8 + 74623,7} = 2,38 \text{ год,}$$

где  $K = 1\,056\,244$  долл. – инвестиции в установку, которые включают в себя проектно-конструкторские работы, приобретение и монтаж машин и оборудования, возведение построек и минимально необходимый оборотный капитал для запуска производства.

Чистый дисконтированный доход

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{д}} &= (\Pi_{\text{ч}} + И_{\text{АМ}})D_s - K = (443512,5)4,83 - 1\,056\,244 = \\ &= 1085921,3 \text{ долл.,} \end{aligned}$$

$$\text{где } D_s - \left[ 1 - 1 / (1 + E)_p^{\tau} \right] E^{-1} = \left[ 1 - 1 / (1 + 0,16)^{10} \right] 0,16^{-1} = 4,83.$$

Дисконтированный срок окупаемости

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{-\ln(1 - \tau_{\text{ок.п}}E)}{\ln(1 + E)} = \frac{-\ln(1 - 2,38 \cdot 0,16)}{\ln(1 + 0,16)} = 3,23 \text{ года.}$$

Индекс доходности

$$\text{ИД} = \frac{\mathcal{E}_{\text{д}} + K}{K} = \frac{1085921,3 + 1\,056\,244}{1\,056\,244} = 2,02 \text{ долл./долл.}$$

Вывод: показатели оценки ИП демонстрируют высокую коммерческую привлекательность настоящего инновационного проекта.



Были рассмотрены также другие типы инновационных проектов:

- инновационный проект энергосбережения в энергетическом хозяйстве крупного промышленного предприятия на основе замещения мазута ИКЖТ;
- коммерческий проект Центрального завода по производству ИКЖТ с поставкой топлива топливотребляющим предприятиям в зоне действия завода. Проекты такого рода конкретны [221].

### 5.6. ПОЛНЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ ДЛЯ НоВЭЗа (2003 г.)

В проекте предусматривается строительство на территории НоВЭЗа мини-завода по производству 61 320 т/год ИКЖТ и сжиганию этого топлива в котлах промышленной котельной завода вместо мазута. Цена исходных компонентов «франко-бункер»: технологические шламы – 55 %, цена 150 руб/т; торф (в виде геля) – 5 %, цена 135 руб/т.; мазут – 10 %, цена 3000 руб/т.

Были определены все виды затрат, капиталовложения, на основе чего выполнен расчет конкурентоспособности ИКЖТ по себестоимости для внутреннего потребления НоВЭЗом по сравнению с мазутом (табл. 5.6).

Таблица 5.6

#### Расчет конкурентоспособности ИКЖТ (по себестоимости)

| Наименование   | Показатели |
|--|------------|
| <i>Мазут</i>   |            |
| Цена мазута «франко-бункер», руб/т   | 3000       |
| Калорийность мазута, ккал/кг   | 9500       |
| Цена мазута с учетом коэффициента калорийности, приведенного к ИКЖТ, руб/т | 1083       |
| <i>ИКЖТ</i>  |            |
| Себестоимость ИКЖТ, руб/т  | 447        |
| Калорийность ИКЖТ, ккал/кг   | 3430       |
| Экономия при использовании ИКЖТ (при равной калорийности), руб/т           | 636        |



### *Показатели оценки эффективности проекта*

- Чистая прибыль

$$\Pi_{\text{ч}} = O_{\text{р}} - И = 38\,999\,520 - 27\,397\,265 = 11\,602\,255 \text{ руб/год.}$$

- Простой срок окупаемости

$$\tau_{\text{ок.п}} = \frac{K}{\Pi_{\text{ч}} + И_{\text{АМ}}} = \frac{19\,271\,708}{11\,602\,255 + 1\,406\,791} = 1,48 \text{ года.}$$

- Чистый дисконтированный доход

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{д}} &= (\Pi_{\text{ч}} + И_{\text{АМ}})D_s - K = (11\,602\,255 + 1\,406\,791)4,83 - 19\,271\,708 = \\ &= 43\,561\,984 \text{ руб.,} \end{aligned}$$

где  $D_s - \left[1 - 1/(1+E)^t_p\right]E^{-1} = \left[1 - 1/(1+0,16)^{10}\right]0,16^{-1} = 4,83$ .

- Дисконтированный срок окупаемости

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{-\ln(1 - \tau_{\text{ок.п}}E)}{\ln(1+E)} = \frac{-\ln(1 - 1,48 \cdot 0,16)}{\ln(1+0,16)} = 1,82 \text{ года.}$$

- Индекс доходности

$$\text{ИД} = \frac{\mathcal{E}_{\text{д}} + K}{K} = \frac{43\,561\,984 + 19\,271\,708}{19\,271\,708} = 3,26 \text{ руб/руб.}$$

Как видим, предприятие является весьма привлекательным в финансовом плане.

## **5.7. ФИНАНСОВАЯ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТЬ В СЛУЧАЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗАВОДА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИКЖТ НА ПРОДАЖУ**

Выполненный нами расчет инновационного проекта завода по производству 200 000 т/год ИКЖТ в год для Сахалина в современных экономических условиях показывает также привлекательность для потенциальных инвесторов.



В расчете стоимости компонентов для ИКЖТ составляют:

- уголь – 1000 руб/т;
- нефть (мазут) – 4000 руб/т;
- вода – 10 руб/т.

Расход электроэнергии принят 17...25 кВт · ч/т ИКЖТ. Стоимость электроэнергии 3,5 руб/ кВт · ч.

В основу производства положены технологические модули производительностью 10...12 т/ч. Стоимость полностью автоматизированного модуля составляет 7 528 788 руб.

Завод укомплектован пятью технологическими линиями. Ниже представлена табл. 5.7 расчета конкурентной способности ИКЖТ по сравнению с мазутом.

Т а б л и ц а 5.7

**Расчет конкурентоспособности ИКЖТ**

| Наименование   | Показатели |
|--|------------|
| <i>Мазут</i>   |            |
| Цена мазута, руб/т   | 4000       |
| Калорийность мазута, ккал/кг   | 9500       |
| Цена мазута с учетом коэффициента калорийности, приведенного к ИКЖТ ( $K = 3,0$ ), руб/т | 1270       |
| <i>ИКЖТ</i>  |            |
| Себестоимость ИКЖТ, руб/т  | 894        |
| Калорийность ИКЖТ, ккал/кг   | 3180       |
| Экономия при использовании ИКЖТ на тонну при равной калорийности, руб/т                  | 376        |



Разделим экономию в равных долях между покупателем и производителем. Тогда 1 т ИКЖТ будет стоить

$$\Pi_{\text{ИКЖТ}} = \Pi_{\text{Т}} + \frac{\Theta}{2} = 894 + \frac{376}{2} = 1082 \text{ руб/т.}$$

*Показатели оценки эффективности проекта*

- Чистая прибыль

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ч}} &= O_{\text{р}} - \text{И} - \text{Н} = 216\,400\,000 - 178\,724\,000 - 5\,086\,260 = \\ &= 32\,589\,740 \text{ руб/год.} \end{aligned}$$

- Простой срок окупаемости

$$\tau_{\text{ок.п}} = \frac{K}{\Pi_{\text{ч}} + \text{И}_{\text{АМ}}} = \frac{82\,675\,503}{32\,589\,740 + 8\,508\,000} = 2,01 \text{ года.}$$

- Чистый дисконтированный доход

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{д}} &= (\Pi_{\text{ч}} + \text{И}_{\text{АМ}})D_{\text{с}} - K = (32\,589\,740 + 8\,508\,000)4,83 - 82\,675\,503 = \\ &= 115\,826\,581 \text{ руб.,} \end{aligned}$$

где  $D_{\text{с}} - \left[1 - 1/(1+E)^{\tau}_{\text{р}}\right]E^{-1} = \left[1 - 1/(1+0,16)^{10}\right]0,16^{-1} = 4,83.$

- Дисконтированный срок окупаемости

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{-\ln(1 - \tau_{\text{ок.п}}E)}{\ln(1+E)} = \frac{-\ln(1 - 2,01 \cdot 0,16)}{\ln(1+0,16)} = 2,6 \text{ года.}$$

- Индекс доходности

$$\text{ИД} = \frac{\Theta_{\text{д}} + K}{K} = \frac{115\,826\,581 + 82\,675\,503}{82\,675\,503} = 2,4 \text{ руб/руб.}$$





## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Использование ИКЖТ в качестве топлива в теплоэнергетических установках технологически осуществимо и не требует значительных изменений в технологической схеме производства.

2. Капиталовложения в модернизацию теплоэнергетических установок при переводе их на ИКЖТ окупаются за 2–3 года, а индекс доходности от осуществления подобных инновационных проектов равен 2..3 руб/руб. затрат (при горизонте 10 лет), что делает эффективными не только ИП для энергосбережения на ПП, но и коммерческие проекты заводов по производству и продаже ИКЖТ.

3. Внедрение ВУТ-ИКЖТ в практику целесообразнее всего в настоящее время начинать с объектов малой энергетики, объектов ЖКХ, здесь меньше капиталовложения и выше оборачиваемость капитала.

Эффективность использования ТД ВУС (ИКЖТ) в энергоблоках электроцентралей выше по сравнению с традиционными угольными технологиями.

## **ГЛАВА 6**

### **СЖИГАНИЕ ИКЖТ В ЦИКЛОННЫХ ПРЕДТОПКАХ**

#### **6.1. ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ИКЖТ**

**В**одоугольное топливо является низкорекреационным. Это объясняется высоким содержанием влаги: до 30...40 % в составе топлива. Однако низкая реакционная способность топлива к горению не остается на всем протяжении процесса постоянной. Это качество проявляет себя только на стадии выхода влаги в период воспламенения, что создает основную технологическую сложность при использовании ИКЖТ.

Изучение сжигания капель ИКЖТ на лабораторном стенде (рис. 6.1), а также исследования посредством дериватографа в Лаборатории проблем энергетики показали, что способность к воспламенению (очень низкая у ИКЖТ) быстро растет по мере испарения гигроскопической (внешней) и коллоидной влаги и становится высокой, как у исходного угля на момент воспламенения твердой фазы топлива.

Стенд был предназначен для демонстрации горения ИКЖТ, но позволял определять температуру горения топлива  $t_{\Gamma}$  и температуру воспламенения топлива  $t_{\text{в}}$ .

Более детально воспламенение и горение ИКЖТ изучались при помощи дериватографа С-1500Q. Ниже представлены некоторые результаты исследований. На рис. 6.2 показана скорость горения топлива в зависимости от температуры. На графике представлены три дериватограммы.

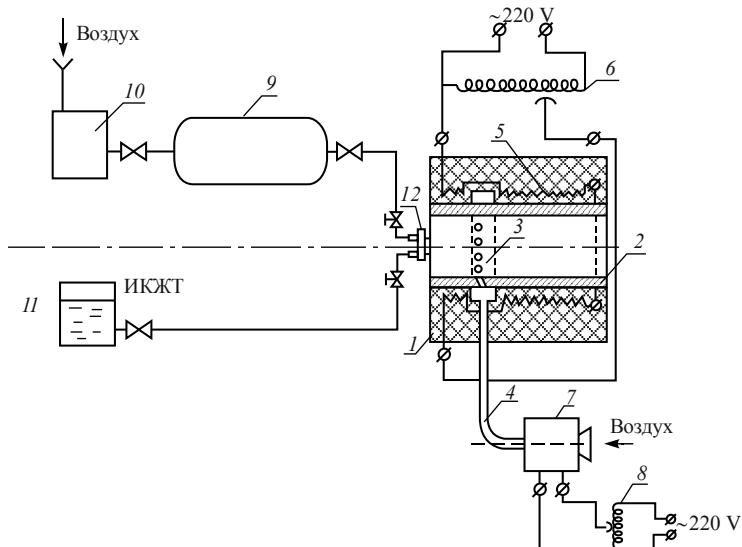


Рис. 6.1. Лабораторный стенд для сжигания ИКЖТ:

1 – электромуфель (адиабатный предтопок); 2 – жаровая труба (высокотемпературная керамика); 3 – распределитель вторичного воздуха; 4 – ввод вторичного воздуха; 5 – электронагреватель; 6 – силовой ЛАТР; 7 – высоконапорный вентилятор; 8 – ЛАТР; 9 – ресивер; 10 – компрессор; 11 – расходный бак ИКЖТ; 12 – форсунка

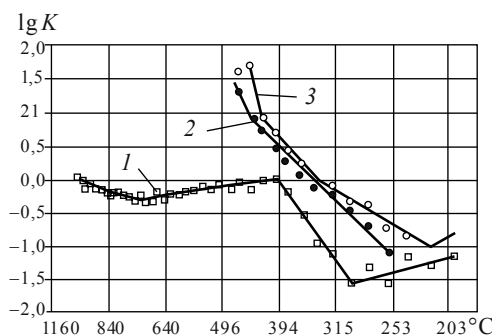


Рис. 6.2. Зависимость скорости реакции горения от температуры:

каменный уголь марки Д (Сахалин): 1 – круп-  
ка  $\varnothing$  1...3 мм; 2 – ИЖТ  $\varnothing$  до 4 мкм; 3 – ультрадисперсный уголь  $\varnothing \sim 30$  мкм (деривато-  
граф С-1500Q)



На графике хорошо видно, что угольная крупка начинает гореть при температуре  $\sim 300^\circ\text{C}$ , при температуре  $\sim 400^\circ\text{C}$  кинетическое горение переходит в диффузное, а при температуре  $\sim 690^\circ\text{C}$  начинает гореть кокс, горение заканчивается при температуре  $\sim 1000^\circ\text{C}$ .

В ИКЖТ выход летучих начинается при температуре  $\sim 290^\circ\text{C}$ , ниже этой температуры идет процесс сушки топлива: при выходе внешней влаги, гидроскопической и коллоидной, возможно, частично капиллярной. Горение кокса начинается при температуре  $\sim 450^\circ\text{C}$  и заканчивается при температуре  $\sim 480^\circ\text{C}$ .

Горение ультрадисперсного угля начинается при температуре  $\sim 255^\circ\text{C}$ , горение кокса – при температуре  $\sim 450^\circ\text{C}$ .

Кинетические кривые ИКЖТ и ультрадисперсного угля практически проходят очень близко друг к другу и имеют одинаковый характер, что, несомненно, говорит о высокой реакционной способности ИКЖТ (ТД ВУС) на основной стадии горения.

Нами были исследованы также композиционные составы ИКЖТ с добавлением жидких субстанций, которые значительно увеличивают воспламеняемость топлива. Так, исследовалось топливо, в котором вместо воды использовался экстракт из сильно загрязненной нефти из так называемых «нефтяных амбаров», которых очень много на территории РФ.

Полученное топливо по своим свойствам и технологическим характеристикам превосходит лучшие сорта топливных мазутов (флотские мазуты):

- теплота сгорания этого топлива была такая же, как у мазута, –  $9000\text{ ккал/кг}$ ;
- температура замерзания этого топлива составила приблизительно  $-50^\circ\text{C}$ ;
- себестоимость такого топлива была примерно на уровне обычных топливных мазутов.

Еще один вид композиционного топлива был исследован нами для решения проблемы утилизации жидких отходов, возникающих при производстве биотоплива (проект «биодизель» на основе рапса).

При производстве жидкого моторного топлива из растительного сырья побочным продуктом является технический глицерин, сильно загрязненный метанолом. Прямое сжигание этого продукта законодательно запрещено из-за высокого процентного содержания метанола, переработка этого отхода для отделения глицерина нерентабельна.



Нами было выполнено исследование по утилизации глицерина в смеси со спиртом в составе ИКЖТ. Из-за ограничений метанол был заменен этанолом.

Простое смешение глицерина и спирта с ультрадисперсным углем не позволяло произвести качественное сжигание топлива, поскольку спирт, глицерин и угольный порошок выгорали отдельно в разной последовательности и в различном диапазоне температур. Только топливо, приготовленное по технологии ИКЖТ, обладало высокой гомогенностью и интегрированными топливными свойствами, что дало возможность определять его как топливную систему, а не смесь. Было изготовлено несколько образцов с различным содержанием компонентов, которые были исследованы при помощи современной комплексной установки термического анализа NETZSCH Jupiter STAC. Лучший результат был получен на образце Fuel № 3.

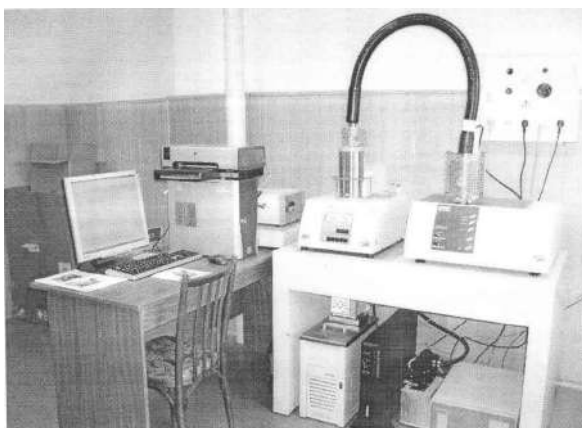
Ниже приведены характеристики комплекса и результаты исследования на примере этого образца.

### **Описание оборудования**

Исследование процесса горения экспериментальных образцов топлива производилось на приборе синхронного термического анализа NETZSCH Jupiter STA 449 C (Германия) в сопряжении с масс-спектрометром Aeolos II. Данная измерительная система позволяет синхронно производить исследования термографическим методом (ТГ) и методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Измерительная система оборудована вакуумплотной Pt-Rh печью, что обеспечивает возможность работы в вакууме до 4 мбар, окислительной, восстановительной и инертной среде в температурном диапазоне от комнатной до 1500 °C. Система NETZSCH Jupiter STA 449 C оборудована высокоточными весами с разрешением по массе 0,1 мг, чувствительностью и диапазоном взвешивания до 5 г. Приборы синхронного термического анализа NETZSCH Jupiter STA 449 C оборудованы квадрупольным масс-спектрометром, детектирующим массы при давлении от 1 до 300 атм. Минимальная регистрируемая концентрация компонентов с определенной массой в газовой фазе – 1 ppm. При этом регистрация СО осложнена наличием азота в исходной смеси. Масс-спектрометр соединен с прибором с помощью капиллярного подключения, прогреваемого в диапазоне температур от комнатной до 300 °C. Прибор синхронного термического анализа NETZSCH Jupiter STA 449 C в сопряжении с масс-спектро-

метром Aeolos II полностью автоматизирован, за исключением стадии загрузки образца и управления с помощью русифицированного программного обеспечения под оболочкой MS WINDOWS, позволяющего проводить измерения и расчеты данных ДСК/ТГ.

Внешний вид системы анализа NETZSCH Jupiter STA 449 C с масс-спектрометром показан на рис. 6.3.



*Рис. 6.3.* Прибор синхронного термического анализа NETZSCH Jupiter STA 449 C с масс-спектрометром Aeolos II

Состав образца Fuel № 3:

- глицерин  $C_3H_5(OH)_3$  – 25 %;
- спирт  $C_2H_5OH$  – 10 %;
- вода  $H_2O$  – 15 %;
- угольный порошок (уголь Б2) – 50 %;
- масса образца – 28,3 мг.

### 6.1.1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы нагревали в окислительной среде в диапазоне температур от 40 до 1000 °С со скоростью нагрева 20...50 К/мин. В объем печи подавали газовую смесь 67 %  $N_2$  + 33 %  $O_2$  с расходом в диапазоне 15...30 мл/мин. В процессе исследования получили кривые изменения массы образца от времени, температуры образца в тигле и кривые ДСК. Наиболее интенсивно процесс окисления мог происходить



в газовой фазе над тиглем. Локального контроля температуры и концентраций компонентов газовой фазы печи не проводилось.

Состав газовой атмосферы определяли с помощью масс-спектрометрии на основе анализа газовой смеси на выходе из печи. Анализ газовой атмосферы запускался синхронно с термическим анализом при помощи специализированного программного обеспечения, что позволяло исключить временную разницу в циклах дериватографии и масс-спектрометрии. Линии соответствующих масс газовых компонентов накладывались на кривые ТГ и ДСК. Для исключения конденсации паров в трактах, соединяющих прибор с масс-спектрометром, капилляр и адаптеры подключения термостатировались при 180 °С.

На рис. 6.4–6.7 представлена спектральная диаграмма и дериватограмма топлива Fuel № 3, термогравиметрическая кривая этого топлива, позволяющая проследить все стадии горения топлива: I – испарение и горение спирта  $C_2H_5OH$ ; II – выход летучих, спирта, глицерина и воды, совместное горение летучих; III – горение твердой фазы; IV – горение кокса.

Первая стадия потери массы связана с удалением спирта и воды из образца и подтверждается данными масс-спектрометрии, а именно повышением интенсивности кривой  $m = 18$  (выход воды). Процесс горения образца начинается при температуре 210, 3 °С и сопровождается уменьшением массы образца и повышением интенсивностей кривых  $m = 18$  и  $m = 44$  ( $CO_2$ ), соответствующих  $H_2O$  и  $CO_2$ . В продуктах сгорания глицерин не обнаружен (рис. 6.4). После окисления образца на стенках тигля обнаружен налет, масса налета составляет 0,73 мг (2,6 % от исходной массы образца).

Исследование образцов топлива дериватографическим методом показывает, что во всех образцах сначала происходит удаление спирта и воды как из жидких образцов, так и из твердого. В зависимости от соотношения жидкость : твердое в образцах начало интенсивного окисления находится в диапазоне температур тигля от 145 до 230 °С. По данным масс-спектрометрии установлено, что в рассматриваемых условиях происходит практически полное окисление горючих компонентов до  $CO_2$  и  $H_2O$ . Процесс выделения воды из образца Fuel № 3 без заметного окисления горючих компонентов наблюдается до температуры 145 °С. Далее идет процесс окисления горючих веществ в газовой среде, что подтверждается убылью массы по кривой ТГ и увеличением интенсивности кривых  $m = 18$  и  $m = 44$ , соответствующих  $H_2O$  и  $CO_2$ . Следов паров глицерина и спирта в отходящих газах не обнаружено.

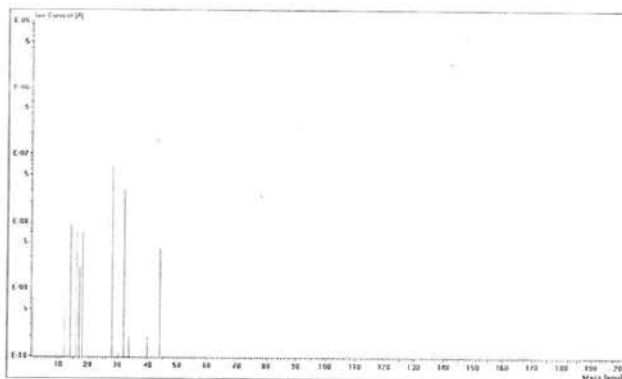


Рис. 6.4. Спектр продуктов сгорания образца Fuel № 3 при температуре 355 °C

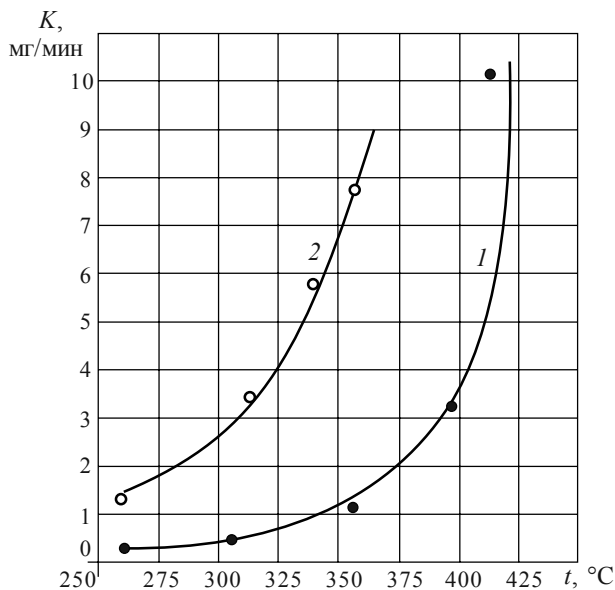


Рис. 6.5. Кинетическая кривая горения ИКЖТ (ВУТ) на основе сахалинского угля Быковского разреза Д-12 (1) и топлива образца Fuel № 3 (2)



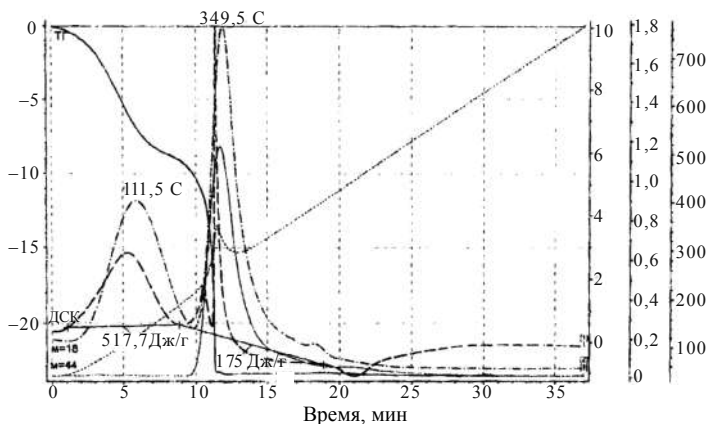


Рис. 6.6. Дериватографические кривые образца Fuel № 3

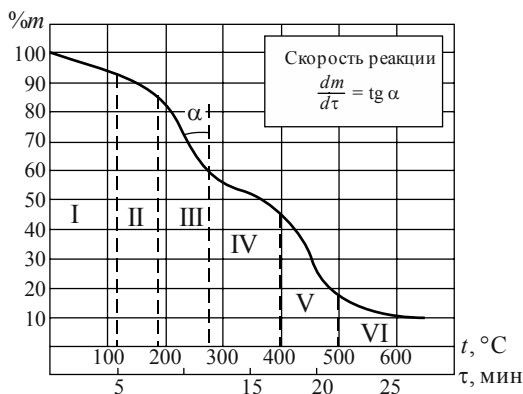


Рис. 6.7. Термогравиметрическая кривая образца Fuel № 3

Добавление высокореакционных жидкостей (спирта и глицерина) в жидкую фазу ИКЖТ заметно увеличивает реакционную способность топлива даже и при большем содержании воды (15...20 %). Это демонстрирует рис. 6.5 при сравнении кинетических кривых горения ИКЖТ и Fuel № 3. Однако теплота сгорания при этом может и не увеличиваться, если эти добавки обладают высокой летучестью, но не обладают высокой тепловой способностью.



### 6.1.2. КРИТЕРИЙ ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ

Система уравнений [222], описывающих процесс горения угольной частицы, была исследована на получение системы безразмерных комплексов, определяющих процесс горения [232]. В числе критериев, полученных из системы дифференциальных уравнений методами теории подобия [223], был критерий, учитывающий топливные свойства частиц (воспламеняемость),

$$K_0 = \frac{Q_{\text{нл}}^{\text{р.г}} G_{\text{л}}^{\text{г}}}{\delta_0 c_{\text{р}}^{\text{г}} T_{\text{ад}}},$$

где  $Q_{\text{нл}}^{\text{р.г}}$  – теплота сгорания летучих горючих;  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$ ;  $G_{\text{л}}^{\text{г}}$  – выход горючих летучих (интегральный),  $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2}$ ;  $\delta_0$  – размер твердой частицы, м;  $c_{\text{р}}^{\text{г}}$  – теплоемкость газовой фазы,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$ ;  $T_{\text{ад}}$  – адиабатическая температура горения топлива, К.

Физический смысл этого критерия – доля теплоты, которая выделяется при сгорании летучих горючих в общей теплоте газообразных продуктов сгорания.

Однако для практических целей этот критерий неудобен, поскольку требует определения  $Q_{\text{нл}}^{\text{р.г}}$ ,  $G_{\text{л}}^{\text{г}}$ ,  $T_{\text{ад}}$ ,  $c_{\text{р}}^{\text{г}}$ . Поэтому мы модифицировали этот критерий, сделав его удобным для инженерных расчетов:

$$K_0 = \frac{Q_{\text{H}_2} \text{H}^{\text{daf}}}{c_{\text{т}} T_{\text{в}}},$$

где  $Q_{\text{H}_2}$  – теплота сгорания водорода,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;  $\text{H}^{\text{daf}}$  – элементное содержание водорода в топке по сухой горючей массе, в долях от единицы,  $\frac{\text{кг}}{\text{кг}}$ ;  $c_{\text{т}}$  – теплоемкость твердого топлива,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $T_{\text{в}}$  – температура воспламенения угля, К.



Что касается теплоемкости топлива и температуры воспламенения кускового твердого топлива в окислительной среде, то данные по этим величинам очень скудны. Однако можно воспользоваться усредненными данными, заимствованными из литературы [224], которые представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

**Значение теплоемкости и температуры воспламенения различных твердых топлив**

| № п/п | Топливо        | Теплоемкость $c_T$ , кДж/кг · К | Температура воспламенения, К |
|-------|----------------|---------------------------------|------------------------------|
| 1     | Торф           | 1,13                            | 503                          |
| 2     | Бурый уголь    | 1,13                            | 523...673                    |
| 3     | Каменный уголь | 1,09                            | 673...773                    |
| 4     | Полуантрацит   | 0,92                            | 773...873                    |
| 5     | Антрацит       | 0,92                            | 873...973                    |
| 6     | Кокс           | —                               | 973...1073                   |
| 7     | Сланцы         | 0,88                            | —                            |

Разумеется, усредненные данные в конкретных случаях способны давать разброс точек на обобщенных зависимостях, однако о величине этого разброса можно судить только после обработки опытных данных. Такая обработка была выполнена для твердого топлива российских месторождений в соответствии со справочными данными [225]. Результаты обработки представлены на рис. 6.8 [224].

Анализ зависимости  $K_0 = f(V^{\text{daf}})$ , представленной на рис. 6.8, позволяет сделать вывод, что критерий воспламеняемости твердого топлива является классификационным, поскольку значение  $K_0$  соответствует определенным группам твердого топлива:

- каменные угли  $6,0 < K_0 < 9,0$ ,
- бурые угли  $9,0 < K_0 < 11,0$ .

Кроме того, использование весьма усредненных значений теплоемкости и температуры воспламенения приводит к разбросу точек в полученной зависимости.

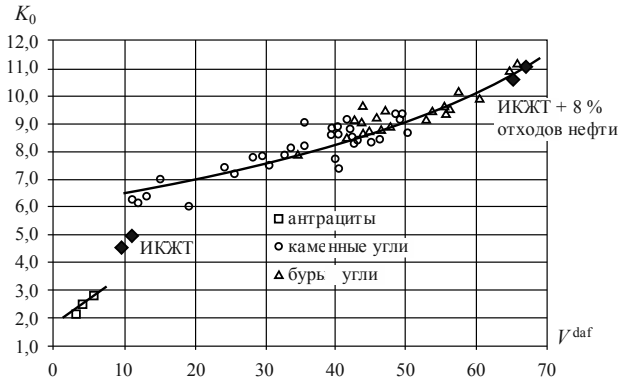


Рис. 6.8. Результаты зависимости  $K_0 = f(V^{daf})$

В связи с этим нами были проведены экспериментальные исследования с образцами твердых топлив (углей) российских месторождений, используемых на электростанциях Новосибирска. Характеристики углей представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

### Характеристики углей Новосибирских ТЭЦ

| №<br>п/п | Разрез, шахта  | Состав топлива |              |                  |                  | $Q_i^r$ ,<br>ккал/кг |
|----------|----------------|----------------|--------------|------------------|------------------|----------------------|
|          |                | $W^p$ ,<br>%   | $A^p$ ,<br>% | $V^{daf}$ ,<br>% | $H^{daf}$ ,<br>% |                      |
| 1        | Бородинский    | 32,7           | 4,8          | 50,0             | 5,2              | 3984                 |
| 2        | Назаровский    | 33,2           | 3,9          | 54,0             | 5,4              | 4032                 |
| 3        | Бачатский-1    | 11,0           | 5,1          | 39,5             | 4,0              | 6696                 |
| 4        | Бачатский-2    | 8,0            | 6,3          | 35,0             | 4,0              | 6842                 |
| 5        | Киселевский    | 7,5            | 16,4         | 39,0             | 4,5              | 5782                 |
| 6        | Красный брод   | 7,0            | 18,9         | 27,0             | 4,0              | 6835                 |
| 7        | Междуреченский | 15,5           | 12,6         | 46,0             | 4,4              | 6000                 |

Для каждого образца были определены теплоемкость и температура воспламенения.



Теплоемкость топлива была определена из соотношения [234]

$$c = \frac{\lambda}{a\rho},$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности вещества,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho$  – плотность топлива,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Температуропроводность образцов топлива определялась в лаборатории кафедры ТЭС НГТУ при помощи метода регулярного теплового режима, основанного на измерении темпа охлаждения и коэффициента формы.

Измерения коэффициентов теплопроводности углей проводились с помощью разработанного в Сибирском государственном научно-исследовательском институте метрологии компаратора-измерителя теплопроводности КТ-6 (метод двухточечного теплового зондирования поверхности исследуемого образца) [226, 227].

Плотность исследуемых образцов топлив определялась при помощи ксилметра, т. е. путем измерения объема спирта, вытесняемого погружными в него образцами. Температура воспламенения измерялась в муфельной печи лаборатории кафедры ТЭС при помощи термомпары ПП и потенциометра ПП-63.

В табл. 6.3 представлены результаты измерений теплоемкости и температуры воспламенения топлив для определения  $K_0$ , а также значения самого критерия воспламеняемости  $K_0$ .

Т а б л и ц а 6.3

**Значения критерия  $K_0$** 

| №<br>п/п | Разрез, шахта  | $c_T$ , кДж/(кг · К) | $T_B$ , К | $K_0$ |
|----------|----------------|----------------------|-----------|-------|
| 1        | Бородинский    | 1,27                 | 540       | 9,1   |
| 2        | Назаровский    | 1,29                 | 548       | 9,2   |
| 3        | Бачатский-1    | 1,04                 | 575       | 8,0   |
| 4        | Бачатский-2    | 1,08                 | 590       | 7,9   |
| 5        | Киселевский    | 1,05                 | 585       | 7,8   |
| 6        | Красный брод   | 1,10                 | 610       | 7,1   |
| 7        | Междуреченский | 1,06                 | 579       | 8,6   |



На рис. 6.9 представлена графическая корреляция  $K_0 = f(V^{\text{daf}})$  для углей, исследованных в проблемной лаборатории энергетики кафедры ТЭС НГТУ.

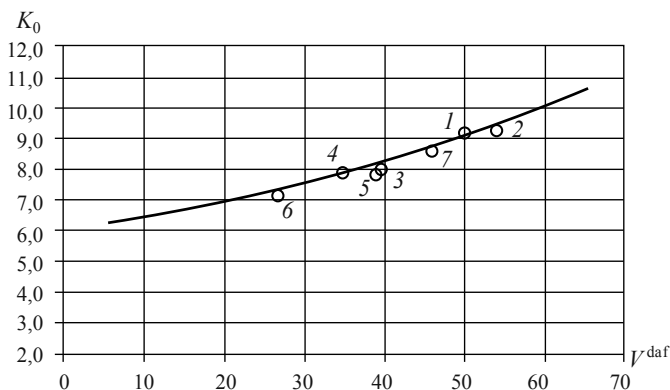


Рис. 6.9. Корреляция  $K_0 = f(V^{\text{daf}})$  для образцов новосибирских ТЭЦ по данным лаборатории ТЭС НГТУ:

1 – Бородинский; 2 – Назаровский; 3 – Бачатский-1; 4 – Бачатский-2; 5 – Киселевский; 6 – Красный брод; 7 – Междуреченский

Из анализа этого рисунка следует, что при точных характеристиках конкретных углей критерий воспламеняемости топлива совершенно определенно отражает реакционную способность топлива на участке воспламенения и поэтому является объективной характеристикой топлива и может служить классификационным фактором.

Можно ли использовать этот критерий для оценки способности к воспламенению водоугольного топлива, которое в этом случае рассматривается как сильно обводненное порошковое угольное топливо? Для этого нужно критерий модифицировать. Исходя из физической сущности критерия  $K_0$  как отношения теплоты, выделяемой летучими горючими при горении у поверхности частицы, к теплоте, поглощаемой твердой частицей при ее нагреве до температуры воспламенения  $T_{\text{в}}$ , следует из теплоты  $Q_{\text{H}_2\text{H}_2}$  вычесть теплоту испарения гидроскопической и коллоидной влаги в составе топливной капли, равной  $r$ , а теплоту, потребную для нагрева частицы до воспламенения, необхо-



димо рассматривать как сумму затрат на нагрев твердой фазы и на нагрев жидкой фазы до кипения.

$$K_0 = \frac{(Q_{H_2} H^{\text{daf}}) m_T - r m_{\text{ж}}}{c_T T_{\text{в}} m_T + c_{\text{ж}} t_{\text{к}} m_{\text{ж}}},$$

где  $m_T$  – доля твердой фазы в топливе;  $m_{\text{ж}}$  – доля жидкой фазы;  $c_{\text{ж}}$  – теплоемкость жидкости;  $t_{\text{к}}$  – температура кипения, °С;  $r$  – теплота парообразования жидкой фазы,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

Критерий  $K_0$  для топлива на основе углей, представленных в табл. 6.3, при условии, что массовая доля угля составляет 0,6, а воды соответственно 0,4, имел значения: Бородинский  $K_0 = 4,14$ ; Назаровский  $K_0 = 4,91$ ; Бачатский-1  $K_0 = 3,078$ ; Бачатский-2  $K_0 = 2,96$ ; Киселевский  $K_0 = 3,61$ ; Красный брод  $K_0 = 2,77$ ; Междуреченский  $K_0 = 3,49$ .

Были рассчитаны также  $K_0$  для антрацитов: кузнецкий АР  $K_0 = 2,83$ ; егоринский полуантрацит  $K_0 = 5,08$ ; галимовский АР (Магаданская обл.)  $K_0 = 3,25$ .

Таким образом, воспламеняемость ИКЖТ изначально низкая и сопоставима только с низкореакционными антрацитами. Капля ИКЖТ с размерами 40...80 мкм попадает в среду с температурой ~750...850 °С. Пока не выйдет влага сначала гигроскопическая, потом коллоидная и не образуется так называемый char, высокопористая сфера, но полая внутри, составленная из субмикронных частиц, размеры которой 17...25 мкм, критерий воспламенения не достигает значения, указанного в табл. 6.3.

Расчеты в соответствии с методикой [228] показывают, что время, в течение которого капля проходит от начального состояния до «char», составляет менее 0,1 с и за это время капля проходит путь до 3 м. Дериватографические исследования наглядно демонстрируют также, что за определенное время критерий  $K_0$  изменяется от начального значения до значения, соответствующего  $K_0$  угля, содержащего влагу только в капиллярах.



Воспламеняемость ИКЖТ на огневом стенде была исследована в промышленной лаборатории одного из НИИ в Подмосковье. Топливо для исследования было приготовлено в проблемной лаборатории энергетики НГТУ (каф. ТЭС) по технологии, разработанной в ЗАО «КОМПОМАШ-ТЭК» на основе производственных разработок. Выход основного процесса на режим самовоспламенения ИКЖТ происходил при использовании дополнительного растопочного (инициирующего) топлива. Исследуемое и инициирующее топлива сжигались одновременно в рабочей камере сопла, по мере повышения температуры горелочного устройства (сопла) подача растопочного топлива снижалась и увеличивалась подача ИКЖТ. При достижении температуры  $\sim 750^\circ\text{C}$  подача инициирующего топлива была прекращена и горение ИКЖТ проходило самостоятельно. Таким образом, был определен температурный режим, при котором самовоспроизводится воспламенение горения тонкодисперсной водоугольной суспензии. На рис. 6.10 показан режим самостоятельного горения ИКЖТ.

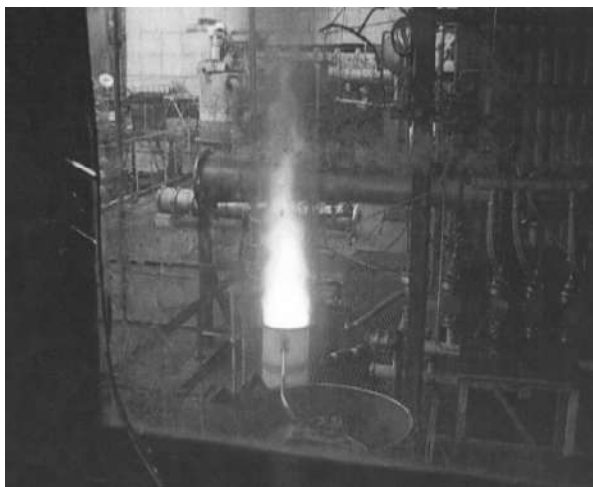


Рис. 6.10. Горение ИКЖТ

Горение проходило устойчиво и не сопровождалось каким-либо колебанием в ходе процесса примерно 40 минут, пока не закончилось топливо.



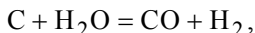


## 6.2. ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ИКЖТ (ТД ВУС) В ЦИКЛОННОМ ПРЕДТОПКЕ

Ранее в ходе лабораторных исследований было установлено, что на самой начальной стадии горения воспламеняемость этого топлива, как и любого ВУТ, низкая и соответствует группе антрацитов и полуантрацитов. Однако после выхода влаги, в зоне высоких температур, ИКЖТ прекрасно горит и скорость горения ИКЖТ соответствует скорости горения тонкодисперсного угля.

Горение углеводорода в составе ИКЖТ начинается, по-видимому, с 230...340 °С на поверхности сферы, которая образуется из капли топлива в факеле.

В капле топлива диаметром 40...50 мкм содержится несколько десятков тысяч субмикронных твердых частиц. Это показывает простой расчет. Во время движения в факеле капля стремительно вращается. Твердые частицы отбрасываются центробежными силами на периферию капли и образуют под ее поверхностью сферический слой. После выхода гигроскопической (внешней) влаги этот сферический слой оказывается поверхностью образованного сфероида, в котором оставшаяся влага представлена коллоидной, капиллярной влагой и влагой во внутренней плоскости сфероида. С этого момента начинается горение углеорода на внешней поверхности сфероида. Сначала это горение происходит в нескольких активных точках (центрах). Пар, который проходит из внутренней части сферы через пористую структуру твердого тела сфероида, на активных центрах взаимодействует с углеродом и образует восстановительные газы:



поскольку температура в этих активных центрах горения доходит до 2300...2500 °С.

По мере развития горения на поверхности сфероида идет прогрев всей массы твердой фазы, сосредоточенной в сфероиде, происходит выделение летучих и горение горючей части летучих над поверхностью сферы. Это водород  $\text{H}_2$  и водородсодержащие газы, например метан  $\text{CH}_4$ . Температура твердой фазы достигает температуры воспламенения, после чего горение охватывает всю массу сфероида.



Таким образом, основной проблемой при сжигании ВУТ-ИКЖТ является низкая воспламеняемость на начальном участке горения, кроме того, существует опасность срыва факела и затягивания длины участка воспламенения. Обычно эта проблема решается с использованием предвключенного адиабатического предтопка, в котором осуществляется воспламенение водоугольного топлива и адиабатическое сгорание части топлива. Доля топлива, сжигаемого в адиабатическом предтопке, составляет 50...60 %, что обеспечивает надежное сжигание остальной части топлива в топке котла.

Футеровка предтопка (шамотный кирпич или глина) является катализатором процесса горения топлива. Предтопок и топка котла должны быть прогреты до температуры футеровки 750...800 °С, что обеспечивает воспламенение факела водоугольного топлива. Для прогрева растопочного аппарата служит отдельное растопочное высокорекреационное топливо: мазут или солярное масло. Это требует дополнительной топливной системы, что, конечно, неудобно, но по этой схеме работают все пылеугольные энергоустановки. Температура горения ВУТ в адиабатическом предтопке составляет 1300...1400 °С.

Вынесение процесса воспламенения ВУТ-ИКЖТ в отдельный предтопок позволяет контролировать этот процесс и управлять им. Предтопок должен быть компактным, выкотеплонапряженным, обеспечивать надежность горения топлива в топке котлоагрегата. Конструкция предтопка должна обеспечивать циклонность движения газов и капель топлива в предтопке и эффективность сжигания.

Исследованием особенностей закрученных потоков и применением вихревых камер для интенсификации различных энерготехнологических процессов занимались: С.В. Алексеенко, К.А. Григорьев, А. Гунта, Г.Н. Делгин, С. Ишизука, Ш.А. Пиралишвили, В.В. Соломатов, Н. Сайред, Ф.А. Серант, А.Н. Штым, К.А. Штым. В работах Л.И. Мальцева, В.И. Мурко, А.Ф. Рыжова, Э.И. Розенфельда, Л.М. Цирульников и других отмечается, что качество сжигания топлива существенно зависит от дисперсности, температуры в зоне горения, концентрации кислорода в факеле, времени нахождения топлива в зоне высоких температур, а также способа сжигания. Эти факторы, в свою очередь, определяются коэффициентом избытка воздуха, аэродинамикой процесса горения, конструкцией горелочных устройств, условиями теплообмена и т. д. Добиться повышения эффективности сжигания



топлива, снижения выбросов вредных веществ и продления ресурса эксплуатации можно за счет применения усовершенствованной технологии циклонно-вихревых предтопок, в которых генерируется концентрированное вихревое движение, и комплексной оптимизации параметров котельной установки [229, 230].

Лабораторией проблем энергетики НГТУ, НПО «Росток», ЗАО «Компомаш-ТЭК» и ЗАО ЗИО «КОТЭС» было выполнено исследование сжигания ИКЖТ-ТД ВУС в муфельных циклонных предтопках на специально созданном огневом стенде на территории НПО «Росток».

### 6.2.1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная методика экспериментального исследования основывается на уравнениях материального (расходного) баланса

$$B'_{\text{ИКЖТ}} + m_{\text{в}} = B''_{\text{ИКЖТ}} + m_{\text{г}} + m_{\text{з}},$$

где  $B'_{\text{ИКЖТ}}$  – масса поступившего в ЦП ИКЖТ, кг;  $m_{\text{в}}$  – масса поступившего в ЦП воздуха, кг;  $B''_{\text{ИКЖТ}} = B'_{\text{ИКЖТ}}(q_4 / 100)$  – масса несгоревшего в ЦП ИКЖТ, кг, где  $q_4$  – механический недожог ИКЖТ в ЦП, %;  $m_{\text{г}}$  – масса газов, образовавшихся при горении ИКЖТ, кг;  $m_{\text{з}} = (B'_{\text{ИКЖТ}} - B''_{\text{ИКЖТ}})A'_{\text{ИКЖТ}} / 100$  – масса образовавшейся в процессе горения ИКЖТ золы, кг, и на уравнениях энергобаланса

$$Q_{\text{р}} + Q_{\text{в}} = Q_{\text{тг}} + Q_3 + Q_4 + Q_5,$$

где  $Q_{\text{р}} = Q'_{\text{ИКЖТ}} + h_{\text{тл}}$  – располагаемое тепло топлива, кДж/кг;  $Q_{\text{в}}$  – тепло, вносимое в ЦП подогретым воздухом, кДж/кг;  $Q_{\text{тг}}$  – теплота топочных газов на выходе из ЦП, кДж/кг;  $Q_3$  – тепловые потери с химическим недожогом топлива, кДж/кг;  $Q_4$  – тепловые потери с механическим недожогом топлива, кДж/кг;  $Q_5$  – тепловые потери от наружного охлаждения, кДж/кг.

Тепловой расчет котла с ЦП при работе на ИКЖТ может выполняться по нормативному методу ВТИ-ЭНИН. При этом расчет теплоты



сгорания ИКЖТ с достаточной степенью точности целесообразно выполнять по теплоте сгорания исходного угля.

Низшая теплота сгорания ИКЖТ

$$Q_{i\text{ИКЖТ}}^r = Q_{i\text{уг}}^r a - R(1 - a),$$

где  $Q_{i\text{уг}}^r$  – низшая теплота сгорания угля, кДж/кг;  $a$  – массовая доля угля в ИКЖТ, кг/кг;  $R = 2260$  кДж/кг – теплота преобразования воды (на испарение дополнительной влаги в ИКЖТ относительно исходного угля).

Потери тепла  $q_3$ ,  $q_4$  при сжигании ИКЖТ в топке котлов с ЦП следует принимать 0...0,5 % и 0,2...1,0 % соответственно в зависимости от марки исходного угля.

Определяющими параметрами для схемы сжигания в котлах с ЦП являются:

- тепловая мощность ЦП на поданное топливо

$$Q_{\text{ЦП}} = \frac{B_{\text{полн}} Q_{i\text{ИКЖТ}}^r}{3600};$$

- тепловая мощность ЦП на сгоревшее топливо

$$Q_{\text{ЦП}}^{\text{сгор}} = \frac{B_{\text{полн}} Q_{i\text{ИКЖТ}}^r}{3600} \left( 1 - \frac{q_4^{\text{ЦП}}}{100} \right);$$

- полезное тепловыделение в ЦП

$$Q_{\text{ЦП}} = B_{\text{полн}} \left( Q_{i\text{ИКЖТ}}^r \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right) + h_{\text{гл}} + Q_{\text{в}} \right) \frac{100 - q_5}{100};$$

- теплонапряжение объема ЦП

$$q_V = \frac{Q_{\text{ЦП}}}{V_{\text{ЦП}}};$$



- теплонапряжение сечения ЦП

$$q_F = \frac{Q_{\text{ЦП}}}{F_{\text{ЦП}}},$$

где  $q_4^{\text{ЦП}}$  – механический недожог ИКЖТ в выходном сечении ЦП, %;  $V_{\text{ЦП}}$  – объем камеры сгорания ЦП, м<sup>3</sup>;  $F_{\text{ЦП}} = \pi r^2$  – площадь сечения ЦП, м<sup>2</sup>.

Экспериментальное исследование горения ИКЖТ в ЦП предполагает выполнение измерений (рис. 6.11) в объеме, необходимом для сведения энергетических и материальных балансов.

Основными параметрами, сопоставляемыми с результатами численных исследований, являются температура факела на выходе из ЦП и температура стенки по длине ЦП. Погрешность определения температуры факела на выходе из ЦП соответствует погрешности измерения входных параметров: расхода, калорийности и температуры топлива, расхода и температуры воздуха.

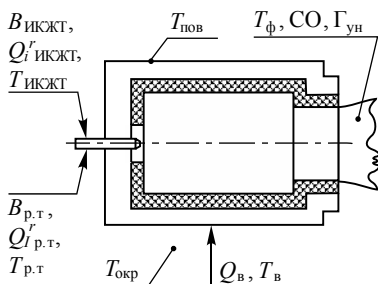


Рис. 6.11. Принципиальная схема измерений в ЦП при сжигании ИКЖТ:

$V_{\text{ИКЖТ}}$  – расход ИКЖТ;  $Q^r_{\text{ИКЖТ}}$  – калорийность ИКЖТ;  $T_{\text{ИКЖТ}}$  – температура ИКЖТ;  $B_{\text{р.т}}$  – расход растопочного топлива;  $Q^r_{\text{р.т}}$  – калорийность растопочного топлива;  $T_{\text{р.т}}$  – температура растопочного топлива;  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающего воздуха;  $T_{\text{пов}}$  – температура поверхности ЦП;  $Q_{\text{в}}$  – расход воздуха;  $T_{\text{в}}$  – температура воздуха;  $T_{\text{ф}}$  – температура факела;  $\text{СО}$  – концентрация  $\text{СО}$ ;  $\Gamma_{\text{ун}}$  – содержание горючих в уносе

Методика численного исследования сжигания ИКЖТ в циклонном предтопке в CFD-программе ANSYS Fluent заключается в определении



основных параметров работы предтопка: температур стенки по длине ЦП, температуры газов на выходе из ЦП, степени выгорания топлива, содержания кислорода.

Некоторые базовые уравнения для расчетов в ANSYS Fluent:

- уравнение неразрывности (сохранения массы)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{\Theta}) = S_m;$$

- закон сохранения импульса

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{\Theta}) + \nabla(\rho \vec{\Theta} \vec{\Theta}) = \nabla p + \nabla \left( \frac{\tau}{\tau} \right) + \rho \vec{g} + \vec{F};$$

- модель турбулентности  $k - \varepsilon$  (стандартного вида)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} + S_\varepsilon;$$

- уравнение энергии

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \left( \vec{\Theta}(\rho E + p) \right) = \nabla \left( k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + \left( \tau_{\text{eff}} \vec{\Theta} \right) \right) + S_h;$$

- уравнение переноса энергии излучением (P-1 модель)

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4an^2 \sigma T^4 = S_G;$$

- уравнение сохранения массы вещества

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i.$$



Горение дизельного (растопочного) топлива описывается соответствующей выбранному виду топлива экзотермической химической реакцией, при этом программа ANSYS Fluent также принимает энергию активации и константу скорости реакции горения. Расход дизельного топлива в численном исследовании определяется исходя из равенства тепловыделения в экспериментальных исследованиях:

$$B_{p.t}^{\text{чис}} = \frac{Q_{ip.t.экс}^r}{Q_{ip.t.чис}^r} B_{p.t}^{\text{экс}},$$

где  $Q_{ip.t.экс}^r$  – низшая теплота сгорания растопочного топлива в экспериментах, кДж/кг;  $Q_{ip.t.чис}^r$  – низшая теплота сгорания растопочного топлива в численных исследованиях, кДж/кг;  $B_{p.t}^{\text{экс}}$  – расход растопочного топлива в экспериментах, кг/с;  $B_{p.t}^{\text{чис}}$  – расход растопочного топлива в численных исследованиях, кг/с.

В численных исследованиях ANSYS Fluent ИКЖТ по типу топлива отнесено к угольным топливам. Состав ИКЖТ определяется в соответствии с экспериментальными и расчетными данными.

В методике численных исследований представлена предлагаемая модель ИКЖТ для расчетного комплекса ANSYS Fluent с учетом кинетических особенностей горения ИКЖТ, а также алгоритм формирования исходных данных. Исследования проводились для ИКЖТ из кузнецкого каменного угля марки Д. В состав ИКЖТ входит собственно кузнецкий каменный уголь марки Д и вода.

Определение основных теплофизических характеристик ИКЖТ (калорийность, плотность и пр.) требует расчета элементного состава конечного продукта исходя из массового соотношения угля и воды.

Модель ИКЖТ (рис. 6.12) для ANSYS Fluent подобрана на основе результатов экспериментальных исследований и проверена серией расчетов. Согласно этой модели ИКЖТ разбивается на три составляющие, которые в расчетах поступают в расчетную область одновременно, с одних и тех же поверхностей и по одной траектории. Такое решение позволяет достигнуть параллельности протекания процессов прогрева частиц, испарения влаги, выхода летучих и горения коксового



остатка, но обеспечивает забалансированность расчетной области водой и водяными парами. При этом снижается температура воспламенения топлива, что отмечалось в многочисленных исследованиях по горению ВУТ. Кинетические параметры горения «угля» и «обводненного угля» в составе модели ИКЖТ задаются одинаково.

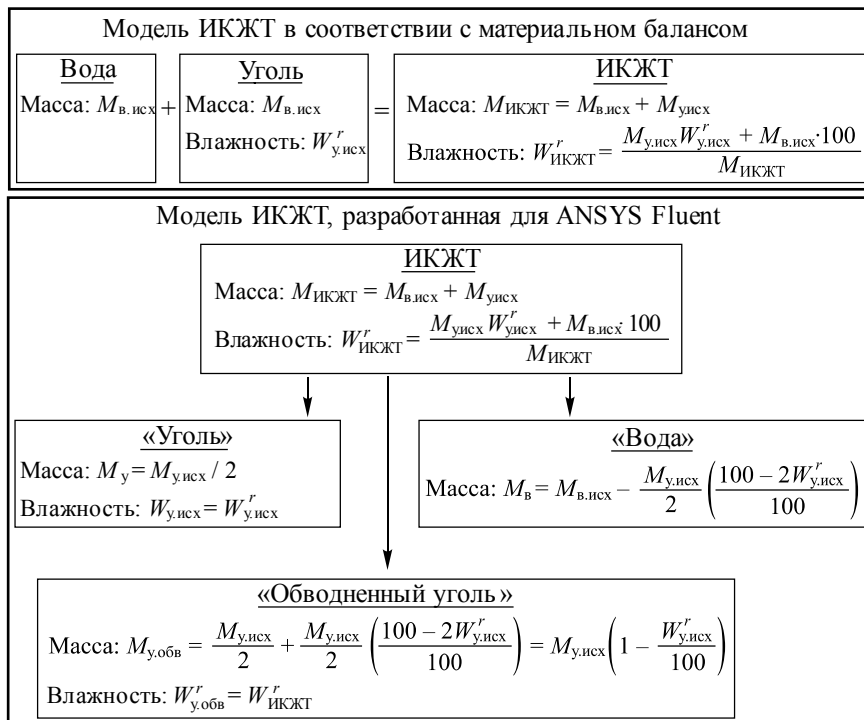


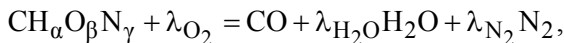
Рис. 6.12. Физическая модель ИКЖТ и модель ИКЖТ, разработанная для ANSYS Fluent

При моделировании конкретной угольной частицы («уголь» или «обводненный уголь») в ANSYS Fluent весь процесс разбивается на следующие стадии.

1. Прогрев частицы угля до начала испарения влаги из топлива (стадия определения температуры начала испарения).
2. Испарение влаги из топлива (стадия протекания при определенной температуре частицы, пока не испарится вся влага).



3. Выделение летучих, представленных неким обобщенным углеводородом вида  $\text{CH}_\alpha\text{O}_\beta\text{N}_\gamma$ , который горит согласно реакции



где  $\lambda_{\text{O}_2}$ ,  $\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\lambda_{\text{N}_2}$  – стехиометрические коэффициенты реакции.

4. Горение коксового остатка рассчитывается по диффузно-кинетической модели. Константа скорости реакции горения коксового остатка ( $k_0$ ) определяется из экспериментально полученной и в дальнейшем обобщенной зависимости  $\ln k_0 = f(E_A)$ . Горение углерода происходит по схеме  $\text{C} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ .

5. Прогрев / охлаждение золowego остатка до выхода частицы из расчетной области (определяется теплоемкостью золовой частицы).

### 6.2.2. УНИКАЛЬНЫЙ ОПЫТНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТД ВУС В ЦП

Для проведения экспериментальной части исследования был разработан проект конструкции циклонного предтопка для сжигания ИКЖТ-ТД ВУС. Предварительная схема этого предтопка показана на рис. 6.13.

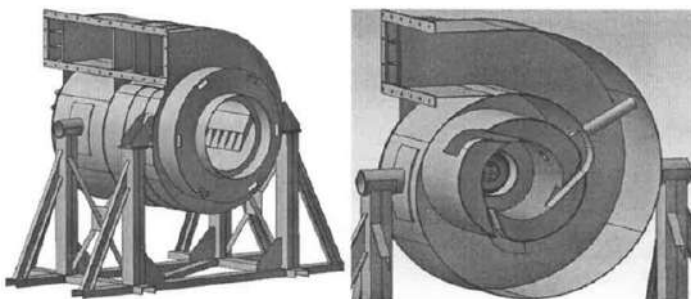


Рис. 6.13. Общий вид и разрез циклонного предтопка

Предтопок имеет форму цилиндра, его общий вид и разрез, а также структурная схема представлены на рис. 6.14.



Нами были выполнено обоснование выбора конструктивно-компоновочных и расходно-термодинамических параметров циклонного предтопка для исследований, дано описание экспериментальной установки, характеристики топлив, схемы измерений (рис. 6.15–6.17), сделана оценка погрешностей. Рассмотрено влияние геометрических характеристик циклонного предтопка на его аэродинамику, проверена и подтверждена экспериментальными данными модель ИКЖТ для CFD-программ. Приведены результаты расчета расходно-термодинамических и конструктивно-компоновочных параметров циклонного предтопка и их анализ. Установлены ограничения по тепловым характеристикам циклонных предтопок. Проведена оценка рациональной тепловой мощности ЦП для энергетических котлов большой и малой мощности [231–237].



Рис. 6.14. Структура циклонного предтопка

На рис. 6.18 представлена фотография испытательного стенда.

По выполненной оценке относительная погрешность расчета тепловыделения в пределах ЦП составляет ~6 %, погрешность измерений температуры на выходе из ЦП в экспериментах составляет ~114 °С, в расчетах ~62 °С.

Экспериментальные исследования показали, что надежную непрерывную подачу ИКЖТ в ЦП с требуемым широким углом раскрытия факела из всех опробованных образцов обеспечивала только пневмомеханическая форсунка. Экспериментально подтверждена возможность организации стабильного горения ИКЖТ в циклонных предтопках (рис. 6.19, а, б), их работоспособность при высоких температурах (рис. 6.19, в, г) и возможность применения ЦП в качестве горелочных устройств для энергетических котлов.

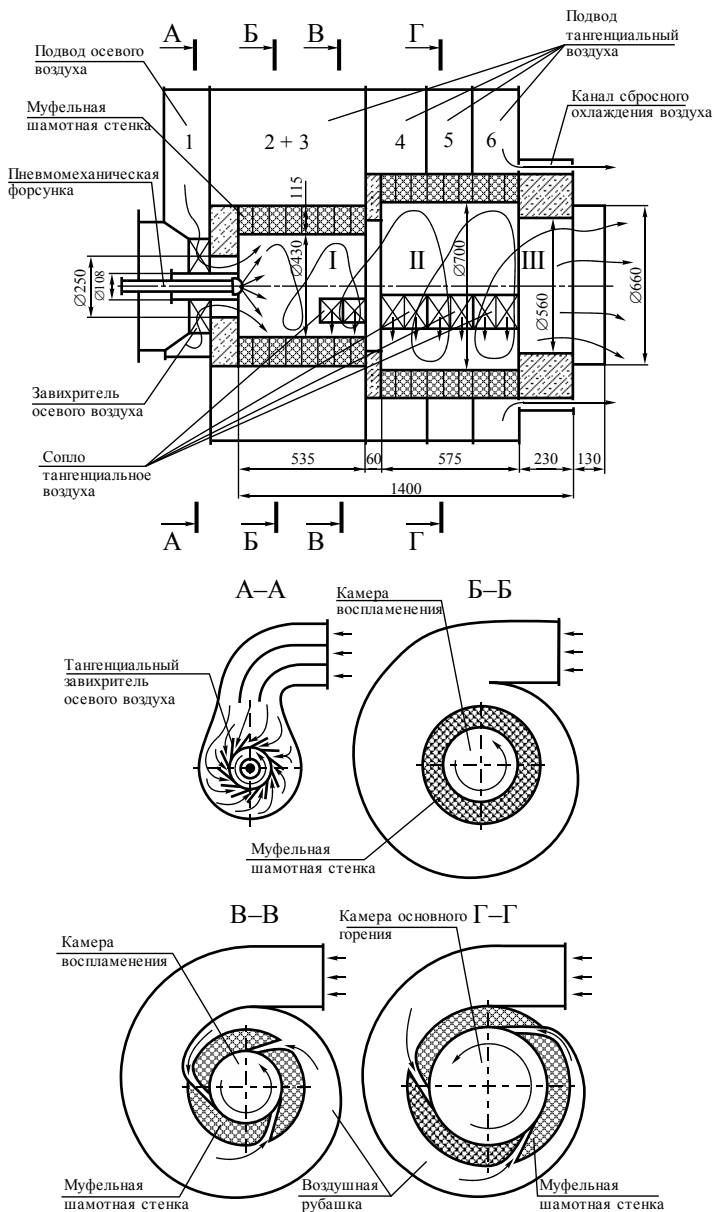


Рис. 6.15. Устройство циклонного предтопка



Рис. 6.16. Фото демонстрационно-испытательной модели циклонного предтопки

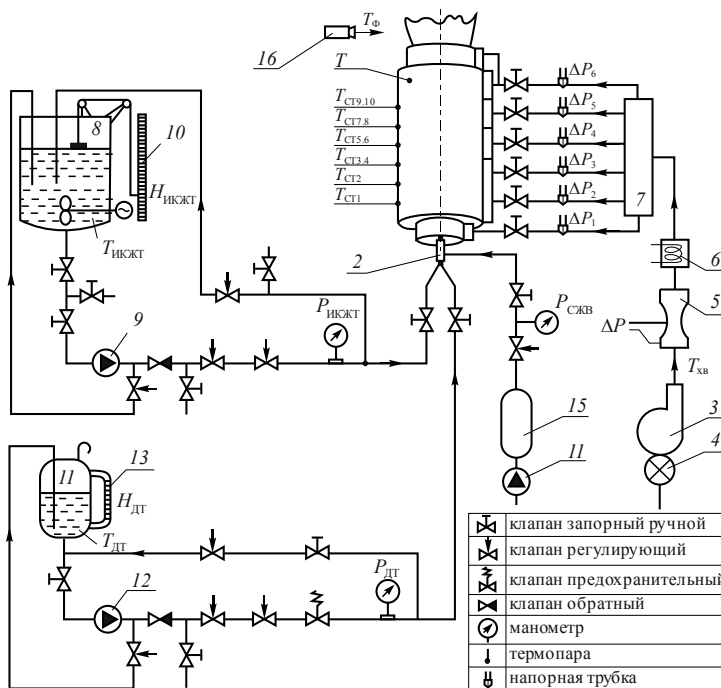


Рис. 6.17. Принципиальная схема измерений:

1 – ЦП; 2 – пневмомеханическая форсунка; 3 – дутьевой вентилятор; 4 – направляющий аппарат; 5 – плоское расходомерное сопло; 6 – электрический калорифер; 7 – раздающий воздушный короб; 8 – расходная емкость ИКЖТ; 9 – насос ИКЖТ; 10 – уровнемер ИКЖТ; 11 – расходная емкость дизельного топлива; 12 – насос дизельного топлива; 13 – уровнемер дизельного топлива; 14 – компрессор; 15 – ресивер; 16 – пирометр

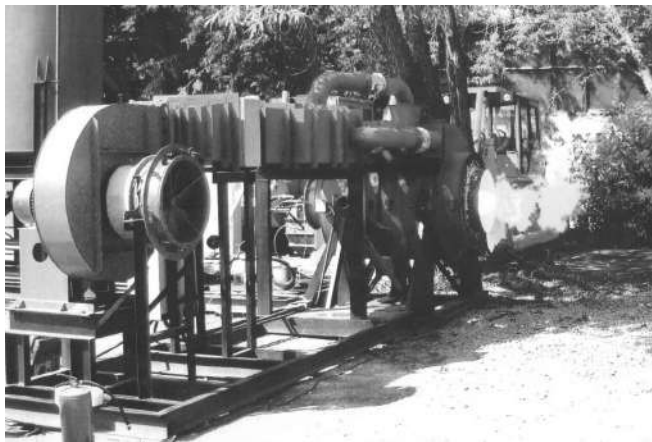
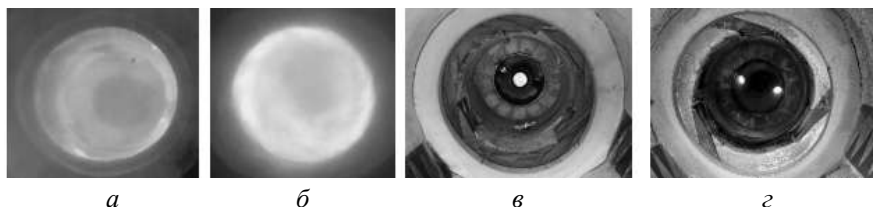


Рис. 6.18. Сжигание ИКЖТ на испытательном стенде с тепловой мощностью горелочного устройства 6,5 МВт



*a*

*б*

*в*

*г*

Рис. 6.19. Фотографии горения ИКЖТ и состояние футеровки:

*a* – после отключения подачи растопочного топлива; *б* – стабилизированный процесс горения ИКЖТ; *в* – состояние муфельной стенки до проведения экспериментов; *г* – состояние муфельной стенки после проведения экспериментов

Экспериментальные и численные исследования горения растопочного дизельного топлива (ДТ) (рис. 6.20–6.22) и ИКЖТ (рис. 6.23–6.26) показали их принципиальную сходимость. Стабильное воспламенение ИКЖТ обеспечивается при температуре футеровки 600...700 °С. Во всех проведенных огневых экспериментах отмечалось формирование кольца структуры факела в поперечном сечении ЦП. Хорошо коррелируют абсолютные значения и динамика распределения температур по длине ЦП, средняя температура газов на выходе из ЦП. Так, при работе на ИКЖТ температура газов на выходе из ЦП составляет 1062 °С, что несколько ниже экспериментальных данных (1090...1160 °С). Раз-



личие температур объясняется погрешностями измерений, различными характеристиками по механическому недожогу топлива (10,4 и 7,4 % соответственно).

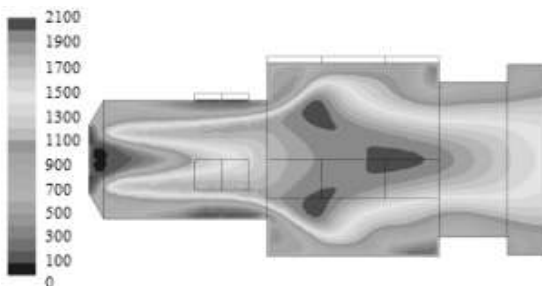


Рис. 6.20. Поле температур по оси ЦП (ДТ), °C

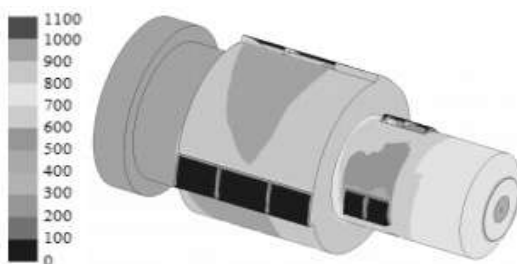


Рис. 6.21. Температурная стенка (ДТ), °C

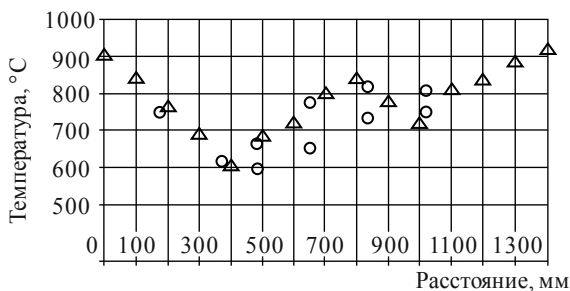


Рис. 6.22. Сравнение расчетных и экспериментальных температур футеровки ЦП (ДТ):

$\Delta$  – расчетные значения;  $\circ$  – экспериментальные данные

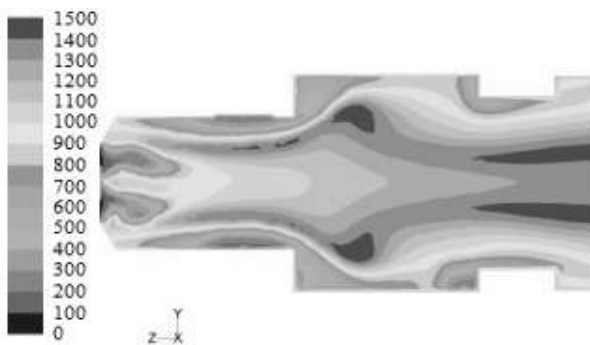


Рис. 6.23. Поле температур в продольном сечении по оси ЦП (ИКЖТ), °C



Рис. 6.24. Температура стенки ЦП (ИКЖТ), °C



Рис. 6.25. Объемная доля кислорода в продольном сечении по оси ЦП (ИКЖТ)

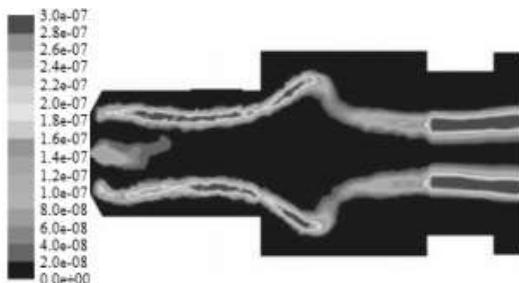


Рис. 6.26. Скорость горения кокса в продольном сечении по оси ЦП (ИКЖТ), кг/с

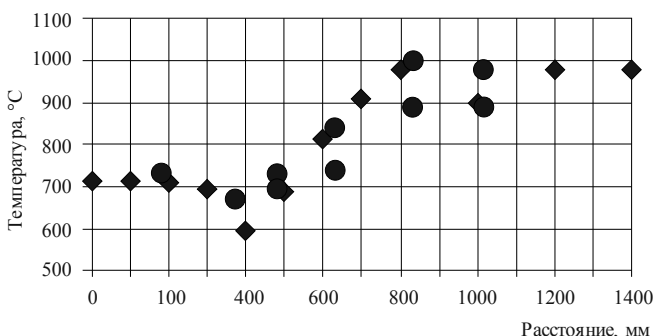


Рис. 6.27. Сравнение расчетных и экспериментальных температур футеровки ЦП (ИКЖТ):

◆ – расчетные значения; ● – экспериментальные значения

Полученные результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных подтверждают адекватность предложенной модели горения ИКЖТ для программного комплекса ANSYS Fluent (CFD) и необходимость корректировки кинетики горения ИКЖТ по сравнению с константами химического реагирования исходного угля. Так, для использованного в исследованиях кузнецкого угля марки Д при проведении расчетов для ИКЖТ следует уменьшить по сравнению с исходным углем параметры: температуру выхода летучих на 26...30 %, энергию активации летучих на 33...37 %, энергию активации кокса ИКЖТ на 10...14 %.



Выполненные многовариантные расчеты аэродинамики ЦП с различными конструктивно-компоновочными и расходно-термодинамическими параметрами показали, что для организации активной зоны рециркуляции следует в технически достижимом диапазоне повышать параметр крутки аксиального воздуха, увеличивать втулочное соотношение камеры воспламенения и кольцевого канала аксиального воздуха и увеличить через него расход воздуха.

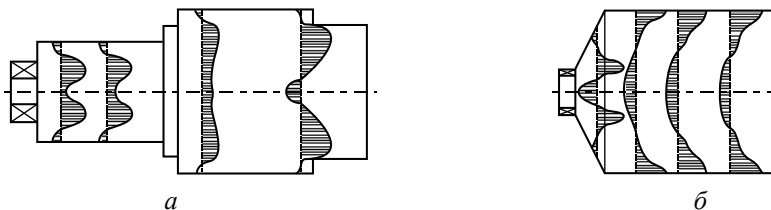


Рис. 6.28. Эпюры осевой составляющей скорости:

*a* – в исходном варианте ЦП; *б* – в рекомендуемом варианте ЦП

При соотношении диаметров камеры воспламенения и аксиального канала воздуха на уровне  $D_{\text{фут}}/d_{\text{внеш}} \approx 3...3,5$  организуется мощная зона рециркуляции (рис. 6.28).

### 6.2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обобщение и анализ результатов экспериментальных и опытно-промышленных исследований по работе котлов, оснащенных муфелями, показывают, что для поддержания стабильности воспламенения угольной пыли низкорреакционных топлив или при работе котлов на пониженных нагрузках суммарная мощность муфелей при их размещении вне основных горелок должна составлять 20...30 % от мощности основных работающих горелок. В случае использования ИКЖТ в качестве оценки предлагается обеспечивать суммарную тепловую мощность ЦП близкой к 30 % тепловой мощности основных горелок.

В качестве примера в табл. 6.4 представлены рекомендуемые мощности ЦП для линейки котлов различной паропроизводительности.



Таблица 6.4

**Рекомендуемые мощности ЦП для котлов большой мощности**

|   |            |            |          |          |           |           |           |
|---|------------|------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Паропроизводительность, т/ч   | 160        | 220        | 320      | 420      | 500       | 670       | 820       |
| Тепловая мощность топki, МВт  | 124        | 168        | 235      | 310      | 370       | 580       | 600       |
| Тепловая мощность вихревых горелок, МВт                             | 25...35    | 25...35    | 35...50  | 35...50  | 35...50   | 35...50   | 35...50   |
| Тепловая мощность прямоточных горелок, МВт                          | 35         | 25         | 25...35  | 25...35  | 35...50   | 50...75   | 35...50   |
| Диапазон тепловых мощностей горелок, МВт                            | 25...35    | 25...35    | 25...50  | 25...50  | 35...50   | 35...75   | 35...50   |
| Рекомендуемая тепловая мощность ЦП ( $0,3Q_{\text{осн.гор}}$ ), МВт | 7,5...10,5 | 7,5...10,5 | 7,5...15 | 7,5...15 | 10,5...10 | 10,5...21 | 10,5...21 |

Проверки разработанных конструктивно-компоновочных и расходно-термодинамических параметров ЦП выполнены для ЦП тепловой мощностью 12 МВт (рис. 6.29) при его совместной работе с серийным котлом (типа ДКВр-20-13) [239].

Результаты расчетов в ANSYS Fluent (рис. 6.30, 6.31) показывают высокую степень выгорания ИКЖТ в пределах ЦП ( $\approx 60\%$ ), что обеспечивает достаточное тепловыделение для поддержания стабильности горения ИКЖТ. В топочную камеру поступают газы с высокой температурой, где остатки несгоревшего топлива при подаче дополнительного воздуха эффективно сжигаются в высокотурбулизированном потоке. Недожог топлива в пределах топочной камеры не превышает  $1...2\%$ . Принятые для расчета значения коэффициента теплоотдачи и степени черноты для радиационных поверхностей нагрева и величины теплосъема для конвективных поверхностей нагрева подтверждаются тепловыми расчетами, выполненными в программе Boiler Designer. Разность значения температуры на выходе из топki составляет  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\delta = 1,1\%$ ), температура за кипяtilьным пучком –  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\delta = 0,5\%$ ), при этом величина механического недожога топлива различается на  $\Delta q_4 = 0,8\%$ , а степень выгорания ( $1 - q_4$ ) различается на  $\delta \approx 0,8\%$ .

При полученном  $60\%$ -м выгорании ИКЖТ в пределах ЦП температурный уровень внутри ЦП позволяет работать в режиме твердого



шлакоудаления, что предпочтительно как для существующих, так и для новых котлов.

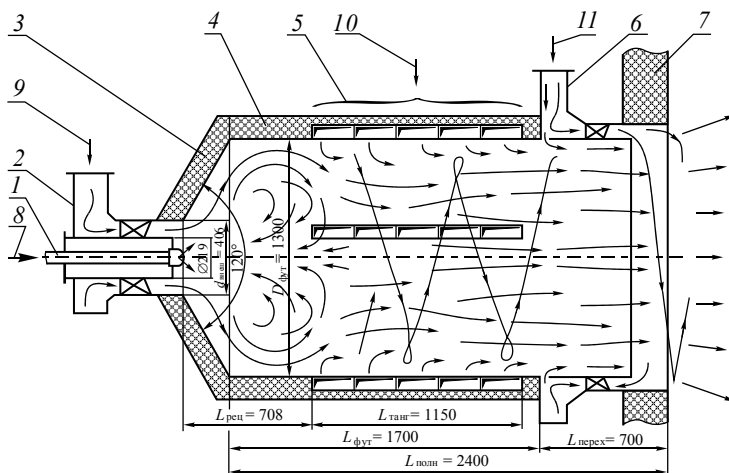


Рис. 6.29. Конструкция ЦП тепловой мощностью 12 МВт:

1 – пневмомеханическая форсунка; 2 – вихревая горелка; 3 – передняя коническая стенка; 4 – цилиндрический футировочный корпус; 5 – сопла тангенциального воздуха; 6 – короб третичного воздуха; 7 – стенка котла; 8 – подача ИКЖТ; 9 – подача аксиального воздуха; 10 – подача тангенциального воздуха; 11 – подача третичного воздуха

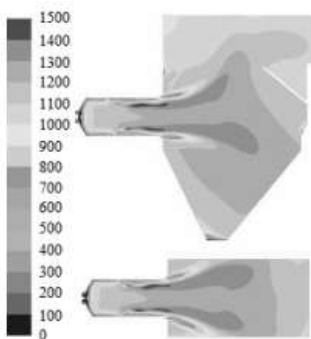


Рис. 6.30. Поля температур по оси ЦП, °С



Рис. 6.31. Поля температур в поперечных сечениях ЦП, °С

Выполненная на основе многовариантных расчетов рационализация ЦП совместно с результатами экспериментальных исследований позволила определить следующие параметры и зависимости.

- Рекомендуемое теплонапряжение объема ЦП:  $q_{V\text{доп}} = 3,7 \pm \pm 0,22 \text{ МВт/м}^3$ .

- Рекомендуемое теплонапряжение сечения ЦП:  $q_{F\text{доп}} = 9,0 \pm \pm 0,54 \text{ МВт/м}^2$ .

- Объем ЦП:  $V_{\text{ЦП}} = (0,27 \pm 0,13) Q_{\text{ЦП}}$ .

- Диаметр ЦП:

- по теплонапряжению объема ЦП:  $D_{\text{ЦП}}^V = (0,912 \pm 0,045) \sqrt[3]{V_{\text{ЦП}}}$ ;

- по теплонапряжению сечения ЦП:  $D_{\text{ЦП}}^F = (0,376 \pm 0,012) \sqrt{Q_{\text{ЦП}}}$ .

- Длина ЦП:  $L = (1,7 \pm 0,25) D_{\text{ЦП}}$ .

- Внешний диаметр аксиального завихрителя:  $d_{\text{акс}} = (0,32 \pm \pm 0,02) D_{\text{ЦП}}$ .

Диаметр ЦП мощностью до 12 МВт рекомендуется определять на основе теплонапряжения объема, свыше 12 МВт – на основе теплонапряжения сечения.



## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6

1. Предложена новая технология использования в энергетике тонкодисперсного водоугольного топлива (ИКЖТ).

2. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что ИКЖТ (ТД ВУС) по воспламеняемости является низкорреакционным топливом на участке воспламенения и высокорреакционным на основном участке горения (сжигания углерода), сопоставимым с ультрадисперсным углем. Это необходимо учитывать при разработке горелочных устройств для сжигания ИКЖТ.

3. Разработаны конструктивно-компоновочные параметры циклонных предтопок, защищены патенты РФ.

4. Разработаны методики экспериментального и численного исследования, анализа показателей тепловой экономичности, расчета конструктивно-компоновочных и технико-экономических параметров новой технологии использования на ТЭС ИКЖТ с учетом изменения энергии активации, особенностей горения ИКЖТ и требований по установке циклонных предтопок.

5. Выполнено экспериментальное исследование горения ИКЖТ в циклонном предтопке с определением характерных особенностей работы ЦП, условий воспламенения ИКЖТ, основных влияющих параметров.

6. Разработана расчетная модель горения ИКЖТ в топках котлов на основе использования математических моделей CFD, сформирован алгоритм расчета, выполнено математическое моделирование горения ИКЖТ в циклонном предтопке и топке котла, оснащенного циклонным предтопком; выполнено сопоставление результатов численного и экспериментального исследований.

7. Выполнены многовариантные расчеты горения ИКЖТ в циклонных предтопках и показано:

- температура стенки (футеровки) ЦП, необходимая для воспламенения ИКЖТ, составляет 650...700 °С;

- рекомендуемое теплонапряжение объема ЦП:  $q_{V\text{доп}} = 3,7 \pm \pm 0,22 \text{ МВт/м}^3$ ;

- рекомендуемое теплонапряжение сечения ЦП:  $q_{F\text{доп}} = 9,0 \pm \pm 0,54 \text{ МВт/м}^2$ ;



- рекомендуемая тепловая мощность ЦП составляет 30 % от мощности основных горелок и для котлов паропроизводительностью 160...820 т/ч – 7,5...21 МВт;

- объем ЦП:  $V_{\text{ЦП}} = (0,27 \pm 0,13) Q_{\text{ЦП}}$ ;

- диаметр ЦП мощностью до 12 МВт рекомендуется определять по формуле  $D_{\text{ЦП}}^V = (0,912 \pm 0,045) \sqrt[3]{V_{\text{ЦП}}}$ , свыше 12 МВт:  $D_{\text{ЦП}}^F = (0,376 \pm 0,012) \sqrt{Q_{\text{ЦП}}}$ ;

- длина ЦП:  $L = (1,7 \pm 0,25) D_{\text{ЦП}}$ ;

- внешний диаметр аксиального завихрителя:  $d_{\text{акс}} = (0,32 \pm \pm 0,02) D_{\text{ЦП}}$ , при этом рекомендуется иметь  $D_{\text{ЦП}} < 600$  мм;

- температуру выхода летучих, энергию активации летучих и кокса ИКЖТ из каменных углей марки Д в расчетах следует уменьшать по сравнению с исходным углем на 26...30 %, 33...37 % и 10...14 % соответственно.

Совокупность полученных результатов составляет научную новизну выполненной разработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В главе 1 рассмотрена теория ВУС-ВУТ, которая в настоящее время трудами многих ученых разработана достаточно для понимания физических и химических процессов при создании устойчивых и калорийных топливных систем с минимальной вязкостью. Однако некоторые вопросы требуют дополнительных исследований, в частности, поиска новых более эффективных и дешевых дисперсантов и стабилизаторов, а также исследования топлив с деминерализованными углями ( $A < 1 \dots 1,5 \%$ ).

Технология производства ВУТ, реализованная на опытно-промышленных и некоторых крупных промышленных установках, основана на применении теории ВУТ, но технологически базируется на традиционной для углепереработки технике 50–80-х годов XX века. Эти установки характеризуются высоким энергопотреблением, металлоемки, требуют значительных капиталовложений, что в основном и определяет их неконкурентность с традиционным способом использования угля.

Предлагаемая новая технология производства ИКЖТ основана на использовании современных аппаратов, не применявшихся ранее в углепереработке. Размол угля до получения ультрадисперсной угольной пыли производится в высокоскоростных дископальцевых мельницах ударно-скалывающего типа воздействия – дезинтеграторах. Водугольная суспензия для получения тонкодисперсной гомогенной топливной системы перерабатывается в кавитаторах при использовании кавитационных процессов.

Угольная пыль после дезинтеграторов активирована и аккумулирует в себе часть энергии ударного воздействия, жидкая фаза – вода после кавитатора также активирована и запасает в себе часть энергии



ударных волн кавитационного поля. При соединении этих двух активированных фаз топливная система приобретает новые свойства, в том числе повышенную стабильность и реакционную способность.

В главе 2 выполнен анализ литературных источников, описывающих теоретические и экспериментальные результаты исследования работы диспергаторов и кавитаторов, а также рассмотрены конструкции различных аппаратов. На основе анализа сформулированы требования к конструированию и изготовлению эффективных дезинтеграторов и кавитаторов.

Разработаны технологические модули для производства ИКЖТ различной производительности, оснащенные КИП и автоматикой, по своим удельным показателям соответствующие энергосберегающим и ресурсосберегающим установкам.

В главе 3 рассмотрены известные в литературе методики исследования характеристик ВУС-ВУТ. Анализ этих методик показал, что исследование ИКЖТ может быть выполнено на основе существующих методик исследования обводненных угольных топлив, включая дериватографические и спектрально-аналитические, а реологические – могут выполняться по методикам неньютоновских вязких жидкостей.

В главе 4 представлены результаты лабораторных и промышленных исследований ИКЖТ: крупности, реологических характеристик, седиментационной устойчивости, распыления форсунками, реакционной способности. Получено следующее.

1. ИКЖТ является в отличие от ВУС-ВУТ практически монодисперсным топливом.

2. Крупность ИКЖТ на два порядка меньше крупности традиционных угольных ВУТ. Между ИКЖТ и ВУТ существует значительный разрыв в дисперсности, ИКЖТ является скорее коллоидным топливом, чем суспензией.

3. Отличие в крупности ИКЖТ от известных ВУС-ВУТ влияет на требование к системе сжигания топлива.

4. ИКЖТ является неньютоновской жидкостью дилатантного типа, и ее вязкость описывается моделью Гершеля–Баркли

$$\tau = m\dot{\gamma}^n + \tau_y,$$

где  $n > 1$ .





5. В узком диапазоне рабочего сдвига скорости динамическая вязкость ИКЖТ может быть аппроксимирована регрессионным уравнением вида

$$\mu = a + bD + cD^2,$$

где  $D$  ( $\text{с}^{-1}$ ) – скорость сдвига, а значение сопротивления рассчитано по формулам Пуазейля.

6. Различные композиции ИКЖТ и ВУС с различными углями и содержанием твердой фазы  $\sim 0,5$  имеют близкие значения вязкости в рабочем диапазоне скоростей сдвига, сопоставимые с вязкостью энергетических жидких топлив. Не подтверждается высказываемое в технической литературе мнение о повышенной вязкости ИКЖТ как коллоидного топлива.

7. Содержание твердой фазы в ИКЖТ без увеличения вязкости может быть доведено до 65...70 % при применении специального ингибитора «расжижитель» в количестве 1...2 промилле.

8. Седиментационная устойчивость ИКЖТ наблюдалась в течение одного года. За это время топливная система сохранялась без расслоения при добавках органических стабилизаторов (нефти) не более 10 %. При увеличении доли сырой нефти до 25 % в системе после 6 месяцев хранения начиналась флокулизация, приводящая к нарушению однородности топлива.

Коллоидное ИКЖТ – значительно более устойчивое топливо, чем ВУС и ВУТ, изготовленные по традиционным технологиям. Седиментационная устойчивость ИКЖТ достаточна с точки зрения технологических и коммерческих требований к топливу.

9. Испытания форсунок, выполненные в опытно-промышленных условиях, продемонстрировали удовлетворительный распыл ИКЖТ и моделируемость распыла топлива водой на различных режимах.

Существенных различий при формировании факела распыла на ИКЖТ и воде не обнаружено.

10. Подтверждено, что методики исследования угольных топлив, в частности дериватографическое, могут быть применены при исследовании ИКЖТ. Для определения реакционной способности ИКЖТ



можно использовать ранее полученный при исследованиях композиционных твердых топлив критерий реакционной способности:

- в соответствии с этим критерием на начальной стадии горения (зажигание) ИКЖТ является низкорекреакционным топливом, которое требует особых условий в зоне горения: высокой температуры (не ниже 800 °С) и интенсивного подвода тепла к корню факела для создания высокого напряжения теплового объема в зоне испарения влаги и выхода летучих;

- можно увеличить реакционную способность ИКЖТ путем добавления вместо части воды высокорекреакционного жидкого горючего компонента. Даже небольшое добавление углеводородного топлива либо спирта способно резко увеличить значение критерия реакционной способности композиции.

В главе 5 исследована технико-экономическая эффективность использования ИКЖТ. Методика исследования основана на разработке инвестиционного проекта и анализе движения капиталов при реализации этого проекта.

В качестве проекта замещения мазута искусственным композиционным жидким топливом выполнен расчет эффективности инновационного проекта модернизации ОП – котельной Завода тепловозоремонтного оборудования в г. Павлодаре (Р.К.). Проект выполнен на уровне бизнес-плана с использованием конкретных реальных данных, полученных при обследовании предприятия.

Приведены результаты расчетов полного инновационного проекта для НоВЭЗа (2003 г.). В этом проекте предусматривается строительство на территории НоВЭЗа мини-завода по производству 61 320 т/год ИКЖТ и сжиганию этого топлива в котлах промышленной котельной завода вместо мазута.

Приведены результаты расчета инновационного проекта, выполненного по укрупненным показателям, завода по производству 200 000 т/год ИКЖТ для Сахалина.

Капиталовложения в модернизацию теплоэнергетических установок при переводе их на ИКЖТ окупаются за 2...3 года, а индекс доходности от осуществления подобных инновационных проектов равен 2...3 руб/руб. затрат (при горизонте 10 лет), что делает эффективным не только ИП для энергосбережения на ПП, но и коммерческие проекты по производству и продаже ИКЖТ.



В главе 6 представлены результаты исследования и сжигания ИКЖТ в циклонном предтопке.

1. Предложена новая технология использования в энергетике тонкодисперсного водоугольного топлива (ИКЖТ).

2. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что ИКЖТ (ТД ВУС) по показанию воспламеняемости является низкорекреакционным топливом на участке воспламенения и высокорекреакционным на основном участке горения (сжигания углерода), сопоставимым с ультрадисперсным углем. Это необходимо учитывать при разработке горелочных устройств для сжигания ИКЖТ.

3. Разработаны конструктивно-компоновочные параметры циклонных предтопок, защищены патенты РФ.

4. Разработаны методики экспериментального и численного исследования, анализа показателей тепловой экономичности, расчета конструктивно-компоновочных и технико-экономических параметров новой технологии использования на ТЭС ИКЖТ с учетом изменения энергии активации, особенности горения ИКЖТ и требования по установке циклонных предтопок.

5. Выполнено экспериментальное исследование горения ИКЖТ в циклонном предтопке с определением характерных особенностей работы ЦП, условий воспламенения ИКЖТ, основных влияющих параметров.

6. Разработана расчетная модель горения ИКЖТ в топках котлов на основе использования математических моделей CFD, сформирован алгоритм расчета, выполнено математическое моделирование горения ИКЖТ в циклонном предтопке и топке котла, оснащенного циклонным предтопком; выполнено сопоставление результатов численного и экспериментального исследований.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. CWM in Japan. Vol. 1 / New energy and industrial technology development organization. – Tokyo: NEDO, 1997. – 249 p.
2. Производство и использование водоугольного топлива / В.Е. Зайденварг, К.Н. Трубецкой, В.И. Мурко, И.Х. Нехороший. – М.: Академия горных наук, 2001. – 172 с.
3. *Ходаков Г.С.* Водоугольные суспензии // Энергетика. – 2000. – № 2. – С. 104–119.
4. *Ходаков Г.С.* Водоугольные суспензии в энергетике // Теплоэнергетика. – 2007. – № 1. – С. 35–45.
5. *Харумитцу Янамати, Осаму Мацумото, Масаи Цуруи.* Информационный материал по водоугольному топливу корпорации JGC. – Йокогама, 1995.
6. *Ходаков Г.С.* Дисперсионный анализ высокодисперсных материалов, подлежащих гидротранспортированию // Исследования технологии и оборудования терминальных комплексов магистрального гидротранспорта: сборник научных трудов / ВНИИПИгидротрубопровод. – М., 1985. – С. 96–99.
7. *Редькина Н.И., Ходаков Г.С.* Сорбционные и механосорбционные аспекты реологии водоугольного топлива // Технология приготовления и физико-химические свойства водоугольных суспензий: сборник научных трудов / НПО «Гидротрубопровод». – М., 1991. – С. 15–24.
8. *Редькина Н.И., Ходаков Г.С.* Физико-химические особенности водоугольных суспензий // Технология приготовления и физико-химические свойства водоугольных суспензий: сборник научных трудов / НПО «Гидротрубопровод». – М., 1991. – С. 25–37.
9. *Горская Т.П., Ильин В.К., Пименова Е.Н.* Гранулометрический состав угля и подвижность водоугольных суспензий // Химия твердого топлива. – 1986. – № 6. – С. 105–108.
10. *Басенкова В.Л., Филиппенко Т.А., Зубков Ю.И.* Зависимость структурно-реологических свойств водоугольных суспензий от природы углей и их дисперсности // Химия твердого топлива. – 1988. – № 5. – С. 139–143.
11. Опыт создания экологически чистых угольных технологий // Менеджмент в области экологически чистых угольных технологий / под общ. ред.



М.Г. Беренгартена, А.Г. Евстафьева: материалы I и II Международных летних школ. – М., 1998. – С. 170.

12. Бутылькова Т.Н., Делягин Г.Н. Зола и шлак при сжигании водоугольных суспензий и характеристика отложений на поверхностях нагрева // РЖ Химия. – 1986. – № 15. – С. 118.

13. Klose Reinhard B. DENSECOAL – an alternative to gas and oil // Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Coal Slurry Combustion and Technology, Orlando, FL, 25–27 June 1984. – Pittsburg, PA, 1984. – P. 791–805.

14. Takahashi Y. Development and scale-up of CWM preparation process // Proceedings 20<sup>th</sup> International Conference on Coal Utilization and Fuel Systems. – Florida, USA, 1994. – P. 305.

15. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 162 с.

16. Ходаков Г.С. Некоторые особенности приготовления высококонцентрированных водоугольных суспензий, предназначенных для гидротранспортирования // Исследование технологии и оборудования терминальных комплексов магистрального гидротранспорта: сборник научных трудов / ВНИИ-ПИГидротрубопровод. – М., 1985. – С. 24–31.

17. Потанин А.А. Теория полной реологической кривой течения высококонцентрированных водоугольных суспензий // Физико-химические основы регулирования структурно-реологических свойств и устойчивости высококонцентрированных водоугольных суспензий в процессе трубопроводного гидротранспортирования: сб. науч. тр. / НПО «Гидротрубопровод». – М., 1989. – С. 44–61.

18. Методы регулирования структурно-реологических свойств и коррозионной активности высококонцентрированных дисперсных систем / Н.Ф. Зубкова, А.А. Каблучков, Ю.А. Толасов, Г.С. Ходаков // Труды НПО «Гидротрубопровод». – М.: Нефтегазстройинформ, 1987. – С. 94–100.

19. Транспортирование водоугольных суспензий / Кондратьев А.С., Овсянников В.М., Олофинский Е.П. и др. – М.: Недра, 1988.

20. Кондратьев А.С., Столяров Н.А. О динамической неустойчивости статически устойчивых высококонцентрированных суспензий // Технология приготовления и физико-химические свойства водоугольных суспензий. – М.: Нефтегазстройинформ, 1991. – С. 7–15. – (Труды НПО «Гидротрубопровод»).

21. Thambimuthu K.V., Stover N.S.H., Whaley N. The mechanism of atomization of coal-water mixture // Third European Conference on Coal Liquid Mixtures, Malmo, Sweden, 14–15 October 1987. – Rudby, UK, 1987. – P. 133–149. – (JChemE Symposium series; 107).

22. Урьев Н.Б. Физико-химические основы интенсификации технологических процессов в дисперсных системах // Новое в жизни, науке, технике. Химия. – М.: Знание, 1980. – № 12. – 64 с.



23. *Урьев Н.Б.* Закономерности структурообразования высококонцентрированных водоугольных суспензий // Исследование гидромеханики суспензий в трубопроводном транспорте: сб. науч. тр. / ВНИИПИ гидротрубопровод. – М., 1985. – С. 8–27.

24. *Урьев Н.Б.* Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. – М.: Химия, 1988. – 256 с.

25. Реологические характеристики и стабильность высококонцентрированных водоугольных суспензий из кузнецких углей / А.И. Борзов, С.М. Колесникова, Н.Г. Сикилинда и др. // Химия твердого топлива. – 1987. – № 2. – С. 128–131.

26. *Шульман Э.П., Берковский Б.М.* Пограничный слой неньютоновских жидкостей. – Минск: Наука и техника, 1996.

27. *Ходаков Г.С.* К реологии суспензий // Теоретические основы химической технологии. – 2004. – Т. 38, № 4. – С. 456–466.

28. *Редькина Н.И., Ходаков Г.С.* Физико-химическая трактовка реологических свойств высококонцентрированных суспензий // Технология приготовления и физико-химические свойства водоугольной суспензии. – М.: Нефтегазстройинформ, 1991. – С. 62–67. – (Труды НПО «Гидротрубопровод»).

29. *Ханпель Дж., Бреннер Г.* Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. – М.: Мир, 1976. – 632 с.

30. *Кондратьев А.С., Седов Т.А.* Об одной феноменологической модели эффективной вязкости гидросмесей // Вопросы определения технологических параметров линейной части гидротранспортных систем: сб. науч. тр. / НПО «Гидротрубопровод». – М., 1989. – С. 114–122.

31. *Thomas D.B.* Transport characteristics of suspensions: VIII a note on viscosity of newtonian suspensions of uniform spherical particles // Journal of Colloid Science. – 1965. – Vol. 20, N 3. – P. 267–277.

32. *Frankel N.A., Acrivos A.* On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres // Chemical Engineering Science. – 1967. – Vol. 22. – P. 847–853.

33. *Снасский М.Р.* Физико-химическое моделирование динамики вибрационного уплотнения порошков: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 1988. – 20 с.

34. *Patel P.D., Russel W.B.* A mean field theory for the rheology of phase separated or flocculated dispersions // Colloids and Surfaces. – 1988. – Vol. 31. – P. 355–383.

35. Патент 4780109 США, МКИ<sup>4</sup> C 10 L 1/32. Coal water suspensions involving carbon black / D.P. Malone, D.G. Thompson; Ashland Oil. Dnc. (США). – № 946743; опубли. 25.10.88.

36. Патент 2080354 Российская Федерация, МПК C 10 L 1/32. Способ приготовления водоугольных суспензий для транспортировки по трубопрово-



ду / К.Н. Трубецкой, В.А. Чантурия, Э.А. Трофимова, В.И. Богачев, Г.П. Двойченкова. – № 93038969/04; заявл. 06.08.93; опубл. 27.05.97, Бюл. № 15.

37. *Cheng D.C.-H., Evans F.* Phenomenological characterization of the rheological behaviour of inelastic reversible // *British Journal of Applied Physics.* – 1965. – Vol. 16. – P. 1599–1617.

38. *Usui H., Sano Y.* Thixotropy of a coal water mixture // *Journal of Chemical Engineering of Japan.* – 1985. – Vol. 18 (6). – P. 519–525.

39. *Szymanski J.K., N.A.* Time dependent rheology of a Western Canadian coal water fuel // *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Coal Fuels Preparation and Utilization, Orlando, FL, USA, 27–30 May 1986.* – Orlando, 1986. – P. 117–128.

40. CWM Quality Test Method (CCUJ Method) / Center for Coal Utilization. – Tokyo, Japan, 1994.

41. *Usui H.* A thixotropy model for coal-water mixtures // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics.* – 1995. – Vol. 60, iss. 2–3. – P. 259–275.

42. *Happel J.* Viscosity of suspensions of uniform spheres // *Journal of Applied Physics.* – 1957. – Vol. 28, iss. 9. – P. 1288.

43. *Давыдова И.В., Кликун В.Л., Кои И.А.* Реологические свойства водоугольных суспензий // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С. 78.

44. *Olofinsky E.P., Khodakov G.S.* Optimizing the dispersion process of coal-water slurries // *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Coal and Slurry Technologies, Clearwater, FL, 1989.* – Washington, 1989. – P. 247–260.

45. *Кондратьев А.С., Седова Т.А.* Об одной феноменологической модели эффективной вязкости гидросмесей // Вопросы определения технологических параметров линейной части гидротранспортных систем: сб. науч. тр. / НПО «Гидротрубопровод». – М., 1989. – С. 114–122.

46. *Потанин А.А.* Теория полной реологической кривой течения высококонцентрированных водоугольных суспензий // Физико-химические основы регулирования структурно-реологических свойств и устойчивости высококонцентрированных водоугольных суспензий в процессе трубопроводного гидротранспортирования: сб. науч. тр. / НПО «Гидротрубопровод». – М., 1989. – С. 44–61.

47. *Кондратьев А.С.* Вязкостные свойства неосаждающихся суспензий // Современное состояние и перспективы развития новых специализированных видов транспорта: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. / ЦНТИИП Миннефтегазстроя. – М., 1985. – С. 17–19.

48. Изменение реологических свойств водоугольных суспензий в зависимости от добавок ПАВ различной природы / В.Г. Беденко, Б.Е. Чистяков, В.А. Миньков, Т.С. Губанова // Методы регулирования структурно-реологи-



ческих свойств и коррозионной активности высококонцентрированных дисперсных систем: сб. науч. тр. / ВНИИПИгидротрубопровод. – М., 1987. – С. 15–22.

49. *Рукин Э.И., Горская Т.П., Делягин Г.Н.* Исследование свойств водоугольных суспензий в присутствии поверхностно-активных веществ // Химия твердого топлива. – 1976. – № 4. – С. 152–158.

50. Реологические характеристики водоугольной суспензии при одностадийной схеме помола угля / В.И. Мурко, С.П. Костовецкий, М.Г. Медведев и др. // Прикладные задачи механики процессов гидротранспортирования неоднородных потоков: сб. науч. тр. / НПО «Гидротрубопровод». – М., 1990. – С. 40–45.

51. *Евтушенко Е.А.* Исследование свойств искусственного композитного топлива на базе торфяного геля и низкорекреационных углей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2003. – 18 с.

52. Влияние физико-химических характеристик угля на реологические свойства суспензий / С.М. Колесникова, А.И. Борзов, Л.Б. Лазарева, С.В. Васильев; КАТЭКНИИУголь. – М.: Недра, 1991.

53. *Делидов Ю.В., Бруер Г.Г., Колесникова С.М.* Получение высококонцентрированных водоугольных суспензий из бурых углей Канско-Ачинского бассейна: обзор / ЦНИЭИУголь. – М., 1994. – 24 с.

54. *Трубецкой К.Н., Нехороший И.Х.* Развитие работ по использованию высококонцентрированной водоугольной суспензии в энергетике России // Теплоэнергетика. – 1994. – № 11. – С. 26–29.

55. Совершенствование водоугольного топлива и перспективы его применения / Г.Н. Делягин, В.В. Корнилов, Ю.Д. Кузнецов, Ю.А. Чернегов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1993. – 32 с.

56. Угольные суспензии – новое экологически чистое топливо и технологическое сырье / Г.Н. Делягин, Е.А. Ельчанинов, В.М. Еремеев и др. // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 1991. – № 9. – С. 105.

57. *Шорохов Б.П., Бруер Г.Г.* Высококонцентрированные угольные суспензии – новое топливо для электростанций // Электрические станции. – 1992. – № 11.

58. *Сузуки Ш., Танака Т., Ямагата О.* Характеристика водоугольных суспензий с высокой концентрацией твердого: доклад на XI международном конгрессе по обогащению углей. – Токио, 1990.

59. Угольные суспензии – новый вид экологически чистого топлива: обзор / В.К. Бранчугов, В.С. Зайденварг, А.П. Гриднев, И.Х. Нехороший; ЦНИЭИУголь. – М., 1992.

60. *Bakke E.* Coal utilization: maintaining environmental integrity into 21<sup>st</sup> Century // Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Technical Conference on Coal





Utilization and Fuel Systems. Clearwater, FL, 21–24 March 1994. – Washington: Coal & Slurry Technology Assoc., 1994. – P. 267–270.

61. *Broilick H.I.* Innovative transport modes coal slurry pipelines // Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Coal and Slurry Technologies, Clearwater, FL, 23–26 April 1990. – Washington: Coal and slurry technology Assoc., 1990. – P. 3–10.

62. *Ходаков Г.С., Горлов Е.Г., Головин Г.С.* Водоугольное топливо. Техно-экологические перспективы промышленного использования в период высоких цен на энергоносители // Уголь. – 2006. – № 10. – С. 46–48.

63. *Wang H., Wang S.* An analysis of the engineering feasibility of Coal-Water Slurry injection into the blast furnace // Seventh Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, PA., 10–14 September 1990. – Greensburg, PA, 1990. – P. 233–242.

64. Applied experiences of CWM in industrial furnaces and kilns in China / S. Wang, L. Zhao, H. Wang, Y. Zhao, D. Xia, Q. Hua, X. Zhaug // Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Coal and Slurry Technologies, Clearwater, FL, 23–26 April 1990. – Washington: Coal and slurry technology Assoc., 1990. – P. 143–153.

65. *Zhan L., Wang Z., Lhan.* Development and application CWM technology in China // Proceedings of Second International Symposium on Clean Coal Technology, Beijing, P.R. China, November 1999. – Beijing, 1999. – P. 458–465.

66. *Веньхуа Ли, Веньсин Ли.* Перспективы развития экологически чистых угольных технологий в Китае. – Пекин: Пекинский исследовательский институт углехимии, 1999.

67. *Zhao C.* The development and prospect of coal-water mixture technology in China // Quarterly report of the New Energy and Industrial Technology Development Organisation. – Tokyo, Japan: NEDO, 1991. – Vol. 2, N 6. – P. 37–41.

68. *Dong Ping, Xiao jianli, Lon Yuting.* Influence factors on CWF-preparation and the characteritics of combustion of coal slime // Proceedings of Second International Symposium on Clean Coal Technology, Beijing, P.R. China, November 1999 – Beijing, 1999. – P. 473–477.

69. *Grinzi F., Romani G., Ercolani D.* Snamprogetti reocarb: from the production plants into the boilers // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Coal Fuels Preparation and Utilization, Orlando, FL, USA, 27–30 May 1986. – Orlando, 1986. – P. 947–951.

70. Patent 2009945A, C 10 L 1/32, C 5 G/A3. Application G.B. / G. Gabriolli, E. Forroni, P. Baglioni etc.; Snamprogetti S.P.A. Italy. – Appl. date 12.05.1982; publ. date 08.12.1982.

71. Snamprogetti high coal concentration Slurry preparation plant / V. Lagana, D. Ercolani, M. Prassone, C. Vercellotti // 9<sup>th</sup> International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes. – Rome, Italy, 1984. – P. 77–89.



72. *Ercolani D.* Coal-water fuel technology: engineering and operating experiences related to CWF production plants and pipeline systems // Proceedings of the International Symposium on Structural Technique of Pipeline Engineering, Beijing, China, 15–20 April 1992. – Beijing, 1992. – 13 p.

73. *Ercolani D., Grinzi F.* Experience with coal slurry production, transportation and utilization systems for multiple applications // Proceedings of the IEA-CLM Workshop on the Near Term Commercial Applications of CLM, Clearwater, FL, 26 April 1993. – Paris, France: Interuational Energy, 1993. – 13 p.

74. CWF combustion tests at the Santa Gilla 35 MWe oil-designed utility boiler / M. Cioni, G. De Michele, L. Ghiribelli, S. Pasini, G. Quattroni // Ninth Members Conference of the International Flame Research Foundation, V.P. Noordwijkerhout, Netherlands, 20–24 May 1989. – Noordwijkerhout, 1989.

75. *Hammond T.K., Mathiesen M.M.* Manufacture and commercial use of carbogel coal/water fuel in Canada // 6<sup>th</sup> International Symposium Coal Slurry Combustion and Technology, Orlando, FL, USA, 25–27 June 1984: Proceedings. – Pittsburg, PA., 1984. – P. 982–989.

76. Progress in the use coal-water fuel for electrical power generation in eastern Canada / D.M. Rankin, D.L. Covill, P.J. Read, H. Whaley // Proceeding of the American Power Conference, Chicago, IL, 1986. – Vol. 48. – P. 242–247.

77. *Read P.J., Whaley H., Rankin D.M.* Performance of an electric utility boiler designed for oil but burning coal-water fuel // Third European Conference on Coal Liquid Mixtures, Malmo, Sweden, 14–15 October 1987. – Rugby, UK: The Institute of Chemical Engineers, 1987. – P. 195–204. – (ICHEME Symposium Series; 107).

78. Development of a 16-MWth coal-water/heavy oil burner for front-wall firing / K.V. Thambimuthu, H. Whaley, K.A. Jonasson, A. Benett // Journal of Energy Resources and Technology. – 1990. – Vol. 112, iss. 2. – P. 136–141.

79. *Thambimuthu K.V., Whaley H., Capes C.E.* Pilot-scale combustion studies of coal-water fuels: the Canadian R & D programme // Second European Conference on Coal Liquid Mixtures, London, UK, 16–18 September 1985. – Rugby, UK: The Institution of Chemical Engineers, 1985. – P. 231–251. – (ICHEME Symposium Series; 95).

80. The cape breton development corporations carbogel coal water fuel project / G. Landry et al. // Proceedings: 7<sup>th</sup> International Symposium on Coal Slurry Fuel Preparation and Utilization, New Orleans, Louis, 25–27 June 1984. – Pittsburgh, PA, 1984. – P. 557–568.

81. *Atkins E.G.* Status report on CO-AL Fuel // Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Coal Slurry Fuel Combustion and Technology, Orlando, FL, 25–27 June 1984. – Pittsburgh, PA, 1984. – P. 557–568.

82. CWS (DENSECOAL) from North America for the foreign market / U. Brandis et al. // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Coal and



Slurry Technologies, Clearwater, FL, 22–25 April 1991. – Washington, 1991. – P. 229–237.

83. *Read P.J., Whaley H., Rankin D.M.* Performance of an electric utility boiler designed for oil but burning coal-water fuel // Third European Conference on Coal Liquid Mixtures, Malmo, Sweden, 14–15 October 1987. – Rugby, UK: The Institution of Chemical Engineers, 1987. – P. 195–204. – (ICHEME Symposium Series; 107).

84. *Thambimuthu K.V., Whaley H.* Combustion of coal-liquid mixtures // Principles of Combustion Engineering for Boilers / C.J. Lawn (ed.). – London, UK: Harcourt Brace Jovanovich, 1987. – P. 337–449.

85. The performance of a compact oil-designed utility boiler when firing coal-water fuel / D.M. Rankin, H. Whaley, P.J. Read, D.J. Burnett // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1990. – Vol. 112. – P. 28–30.

86. *Linder G., Rogren L.* Start-up and operating experience of three commercial CWM contractis in Sweden // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Coal Fuels Preparation and Utilization, Orlando, FL, USA, 27–30 May 1986. – Orlando, 1986. – P. 933–946.

87. CEA 9015 G 867. A comparative study of the cost and environmental benefits of coal-liquid fuels and coal preparation plants. – Montreal, Canada: Canadian Electrical Assoc., 1993.

88. *Thambimuthu K.V.* Gas cleaning for advanced coal-based power generation. IEACR/53. – London, UK: IEA Coal Research, 1993. – 163 p.

89. Coal-water fuel conversion and combustion testing in an industrial iron ore palletizing furnace / K.V. Thambimuthu, D.A. Reeve, T. Donnelly et al. // Proceeding Thirteenth International Conference on Coal and Slurry Technology, Denver, CO, 12–15 April 1988. – Washington: Coal and Slurry Technology Assoc., 1988. – P. 399–410.

90. *Rekos N.F., Parsons E.L.* Heat engines. Technology status report, DOE/METC90/0267 / US Department of Energy. – Morgantown, WV: Morgantown Technology Centre, 1989. – 38 p.

91. *Davis B.E., Maxwell R.C.* Coal-water fuels for heat engine and boiler applications-clones or cousins // Proceedings of the Sixteenth International Conference on Coal and Slurry Technologies, Clearwater, FL, 22–25 April 1991. – Washington, DC: Coal and Slurry Technology Assoc., 1991. – P. 755–760.

92. *Bepedek K.R., Maxwell R.C., Parkinson J.* Progress on the development of clean coal-water fuels for use in coal-fired diesel engines // Proceedings of the Sixteenth International Conference on Coal and Slurry Technologies, Clearwater, FL, 22–25 April 1991. – Washington, DC, 1998. – P. 719–730.

93. *Geiling D.W., Smith W.C.* Heat engines. Technology status report, DOE/METC-92/0275 / US Department of Energy. – Morgantown, WV: Morgantown Technology Centre, 1991. – 59 p.



94. Electric utility CWS firing options to reduce NO<sub>x</sub> emissions / R.A. Ashworth, T.A. Melick, D.K. Morrison, J.J. Battista // Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Cleawater, FL, 1998. – Washington, DC: Coal and Slurry Technology Assoc. – P. 719–730.
95. Battista J.J., Ashworth R.A. Co-firing coal water slurry fuel on a tangential-fired boiler // Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Cleawater, FL, 1998. – Washington, DC: Coal and Slurry Technology Assoc. – P. 361–370.
96. Co-firing Coal-Water Slurry fuel with pulverized coal as a NO<sub>x</sub> reduction strategy, Fourteenth / B.G. Miller, S.F. Miller, J.L. Morrison, A.W. Scaroni // Proceedings: 14<sup>th</sup> Annual International Pittsburgh Coal Conference, Taiyuan, P.R. China, 1997. – Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh, 1997.
97. Clean coal technology demonstration program UNECE / US Department of Energy // Symposium on New Coal Utilisation Technologies, Helsinki, Finland, 10–13 May 1993. – Helsinki, 1993.
98. Патент 2312889 Российская Федерация. Способ получения композитного топлива и установка для его осуществления / С.В. Луценко, Ю.В. Овчинников, В.Г. Андриенко. – № 2006125798/04; опубл. 20.12.2007, приоритет 19.07.2006.
99. Дизельный двигатель на угольном топливе / А. Пао, Р. Уилсон, М. Макмиллан, А. Кимберли // Современное машиностроение. Сер. А. – 1990. – № 1. – С. 163–173.
100. Crippa E. 50000HP 12 cylinder coal slurry diesel engine // Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Coal and Slurry Technologies, Clearwater, FL, 23–26 April 1990. – Washington: Coal and slurry technology Assoc., 1990. – P. 821–829.
101. Экспериментальное исследование процесса горения водоугольной суспензии / И.В. Давыдова, Г.Н. Делягин, Б.В. Канторович, В.С. Леваневский // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения / отв. ред. Б.В. Канторович. – М.: Наука, 1965. – С. 140–145.
102. Сжигание обводненных каменных углей с малым содержанием летучих в виде водоугольных суспензий в опытной топке парового котла / Т.Н. Бутылькова, Е.И. Вулканов, Г.Н. Делягин, В.С. Фролов // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С. 135–144.
103. Делягин Г.Н. Об условиях совместного протекания испарения воды и выгорания капли водоугольной суспензии // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С. 55–67.
104. Делягин Г.Н., Сметанников Б.Н. Исследование процесса воспламенения капли водоугольной суспензии // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1965. – С. 67.



105. *Смирнова З.В., Делягин Г.Н.* О взаимодействии обводненного твердого топлива с кислородом // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С. 68.

106. Исследование топочного процесса в паровом котле при сжигании водоугольной суспензии / Е.И. Вулканов, Г.Н. Делягин, В.И. Кирсанов, В.С. Ливановский, А.Г. Онищенко // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С. 122.

107. Сжигание водоугольной суспензии на опытно-промышленной установке / Г.Н. Делягин, Б.В. Канторович, В.И. Караченцев, А.Г. Онищенко // Уголь. – 1964. – № 9.

108. *Делягин Г.Н., Кликун В.Л., Коц И.А.* Мокрый помол каменных углей // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С. 89.

109. Патент 2151170 Российская Федерация, МПК С 10 L 1/32. Жидкое углесодержащее топливо / В.Г. Томилов, Ю.Л. Пугач, Г.В. Ноздренко и др. – № 99116586/04; заявл. 29.07.1999; опубл. 20.06.2000, Бюл. № 17.

110. Патент 2151959 Российская Федерация, МПК F 23 K 5/10. Способ получения жидкого композитного топлива / В.Г. Томилов, Ю.Л. Пугач, Г.В. Ноздренко и др. – № 99111904/06; заявл. 08.06.1999; опубл. 27.06.2000, Бюл. № 18.

111. Патент 2185244 Российская Федерация, МПК В 02 С 21/00. Способ получения жидкого композитного топлива, дезинтегратор и устройство гидроударного действия для его осуществления / Баев В.С. – № 2000120111/03; заявл. 27.07.2000; опубл. 20.07.2002.

112. *Дубинский Ю.Н., Евтушенко Е.А.* Водоугольное топливо (техническая справка). Состояние вопроса. Ч. 1 / ОАО «Новосибирсктеплоэлектропроект». – Новосибирск, 2004. – 16 с. – (На правах рукописи).

113. Патент 2249029 Российская Федерация, С 10 L 1/32, В 01 F 7/28. Способ получения водоугольного топлива и технологическая линия для его осуществления / А.Д. Петраков, С.М. Радченко, О.П. Яковлев. – № 2003123237/04; заявл. 23.07.2003; опубл. 27.03.2005.

114. *Дубинский Ю.Н., Карпов Е.Г., Евтушенко Е.А.* Водоугольное топливо (техническая справка). Анализ результатов и исследование характеристик ВУТ, полученного на опытно-промышленной установке ООО «Енисейский ЦБК». Ч. 2 / ОАО «Новосибирсктеплоэлектропроект». – Новосибирск, 2004. – 33 с. – (На правах рукописи).

115. Патент на полезную модель № 64946. Установка для получения композитного топлива (варианты) / С.В. Луценко, Ю.В. Овчинников, В.Г. Андриенко. – № 20071105399; опубл. 27.07.2007; приоритет 14.02.2007.

116. *Orowan E.* Fracture and strength of solids // Reports on Progress in Physics. – 1949. – Vol. 12. – P. 185–230.



117. *Griffith A.A.* The phenomena of rupture and flow in solids // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. – 1920. – Vol. 221. – P. 163–197.
118. *Щукин Е.В., Перцов А.В., Амелина Е.А.* Коллоидная химия. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 352 с.
119. *Журков С.П.* Проблема прочности твердых тел // Вестник АН СССР. – 1957. – № 11. – С. 78–82.
120. *Резель В.В., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 559 с.
121. *Френкель Я.И.* Введение в теорию металлов. – М.: Физматгиз, 1958. – 424 с.
122. *Гийо Р.* Проблема измельчения материалов и ее развитие. – М.: Стройиздат, 1964. – 111 с.
123. *Сиденко П.М.* Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1977. – 382 с.
124. *Krupa V., Secyla F., Merva V.* Klassifikacia melitelnos pomocon energetikotransfrmacnych merani // Banicke listy (Minoriadne číslo). – Bratislava: VEDA, 1980. – P. 208–213.
125. *Bernhardt C., Heegn H., Jlgén S.* Zur mahlung und aklivering in einer mühle mit calorimeter // Banicke listy (Minoriadne číslo). – Bratislava: VEDA, 1980. – P. 214–220.
126. *Колосов А.С.* Некоторые вопросы моделирования и оценки энергетической эффективности процессов измельчения твердых тел // Известия СО АН СССР. Серия химических наук. – 1985. – № 2, вып. 1. – С. 26–39.
127. *Stairmand C.* The energy efficiency of milling processes: a review of some fundamental investigations and their application to mill design // Zerkleinern (4 Europäischen Symposium), Dechema Vonogr. – Weinheim: Chemie, 1976. – Bd. 79. – P. 1–17.
128. *Hess W.* Einfluss der Schubbeanspruchung und des Verformungsverhaltens bei der Druckzerkleinerung von Kugeln und kleinen Partikeln. Dissertation. – Karlsruhe, 1980.
129. *Kendall K.* The impossibility of comminuting small particles by compression // Nature. – 1978. – Vol. 272. – P. 710–711.
130. *Ходаков Г.С.* Физика измельчения. – М.: Наука, 1972. – 307 с.
131. *Блиничев В.П., Бобков С.П., Клочков Н.В.* Распределение энергии, подводимой к телу в процессе разрушения // Доклады VII Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Ч. 2. – Ташкент, 1981. – С. 152–154.
132. *Schrager R., Hoffman B.* Über die mechanische aktivierung von calciumcarbonat // Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie. – 1969. – Vol. 369. – P. 41–47.



133. *Аввакумов Е.Г.* Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 303 с.
134. *Боуден Ф.П., Тейбор Л.* Трение и смазка твердых тел. – М.: Машгиз, 1960. – 202 с.
135. *Афанасьев Г.Т., Боболев В.К.* Инициирование твердых тел взрывчатых веществ ударом. – М.: Наука, 1968. – 172 с.
136. *Fox P.G., Soria-Ruiz J.* Fracture-induced thermal decomposition in brittle crystalline solids // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences.* – 1970. – Vol. 317. – P. 79–91.
137. *Уракаев Ф.Х.* Теоретическая оценка импульсов давления и температуры на контакте трущихся частиц в диспергирующих аппаратах // *Известия СО АН СССР. Серия химических наук.* – 1978. – № 7, вып. 3. – С. 5–10.
138. *Dachille F., Roy H.* High-pressure phase transformations in laboratory mechanical mixers and mortars // *Nature.* – 1960. – Vol. 186. – P. 34–71.
139. *Красулин Ю.Л.* Об «аномальной» диффузии в материалах при импульсивном нагружении // *Физика и химия обработки материалов.* – 1981. – № 4. – С. 133–135.
140. *Шестопалов Л.М., Ромашкин Ю.П.* Диффузия серебра в пластически деформируемую медь // *Физика твердого тела.* – 1960. – Т. 11, № 12. – С. 2998–3006.
141. *Thiessen P.A., Meyer K., Heinicke G.* Grundlagen der tribochemie. – Berlin: Akademie Verlag, 1966. – 194 p.
142. *Урусовская А.А.* Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов // *Успехи физических наук.* – 1968. – Т. 96, вып. 1. – С. 39–60.
143. *Кротова Н.А., Карасев В.В., Дерягин Б.В.* Исследование электронной эмиссии при отрыве пленки высокополимера от стекла в вакууме // *Доклады АН СССР.* – 1953. – Т. 88, № 4. – С. 777–780.
144. *Линке Э., Гофман К.* Влияние механически возбужденных центров на эмиссию фотонов и электронов при фрезеровании // *Материалы V Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел.* Ч. 1. – Таллин, 1977. – С. 167–171.
145. *Meyer R., Obricat D., Rossberg M.* Progress in triboluminescence of alkali halides and doped zinc sulphides // *Kristall und Technik.* – 1970. – Vol. 5. – P. 5–49, 181–205.
146. *Хренкова Т.М.* Химические превращения углей при механическом диспергировании: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – М., 1983.
147. *Хренкова Т.М., Лебедев В.В., Голденко Н.Л.* Влияние механического измельчения на свойства каменного угля // *Химия и переработка топлив.* – М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1973. – Т. 29, вып. 1. – С. 84–89.



148. *Хренкова Т.М., Финкельштейн Г.Б., Касаточкин В.И.* Электрофизические свойства аморфизированных порошков природного графита // *Химия твердого топлива.* – 1963. – № 1. – С. 145–148.
149. *Хренкова Т.М., Черкинская К.Т., Штеренберг Л.Е.* Изменение физико-химических свойств углей при диспергировании // *Химия твердого топлива.* – 1974. – № 2. – С. 48–52.
150. Характер изменения свойств углей при размоле / Т.М. Хренкова, В.В. Лебедев, Н.Л. Голденко и др. // *Химия твердого топлива.* – 1975. – № 1. – С. 11–17.
151. *Хренкова Т.М., Екатеринина Л.Н., Мотовилова Л.В.* Химические изменения углей при измельчении // *Химия твердого топлива.* – 1977. – № 4. – С. 36–37.
152. *Хренкова Т.М., Лебедев В.В., Голденко Н.Л.* Образование парамагнитных центров при измельчении угля // *Химия твердого топлива.* – 1978. – № 6. – С. 144–146.
153. *Хренкова Т.М., Лебедев В.В., Голденко Н.Л.* Исследование изменения химического строения каменного угля при механодеструкции методами ИК и ПМР спектроскопии // *Доклады VII Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Ч. 2.* – Ташкент, 1979. – С. 103–104.
154. Механохимическая модификация углей в продукты с новыми свойствами, их реакционная способность / Т.М. Хренкова, В.В. Лебедев, Л.П. Никанорова и др. // *Труды IV Всесоюзного совещания по химии и технологии твердого тела.* – М., 1982. – С. 1–11.
155. Изменение физико-химических свойств бурых углей в процессе активации после УДА-обработки / Т.М. Хренкова, З.С. Смуткина, Е.С. Зимина и др. // *Тезисы докладов II семинара УДА-технологии.* – Таллин, 1983. – С. 92–93.
156. *Фисенко В.В.* Критические двухфазные потоки. – М.: Атомиздат, 1978. – 154 с.
157. *Хинт И.А.* Основы производства силикатных изделий. – М.; Л.: Госстройиздат, 1962. – 600 с.
158. *Корнфельд М.* Упругость и прочность жидкостей. – М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1951. – 108 с.
159. *Бирргоф Г., Сарантонелло Э.* Струи, следы и каверны: пер. с англ. – М.: Мир, 1964.
160. *Перник А.Д.* Проблемы кавитации. – 2 изд. – Л.: Судостроение, 1966.
161. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике: пер. с нем. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956.
162. *Рот Н.А.* Возникновение и протекание ультразвуковой кавитации // *Акустический журнал.* – 1957. – Т. 3, вып. 1. – С. 3.





163. *Сиротюк М.Г.* Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // Физика и техника мощного ультразвука: в 3 кн. – М., 1968. – Кн. 2.

164. *Кулагин В.А.* Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Красноярск, 2004. – 47 с.

165. *Алексеев Г.Н.* Общая теплотехника. – М.: Высшая школа, 1980. – 552 с.

166. *Thoma D.* Verhalten einer Kreiselpumpe beim Betrieb im Hohlsgobereich // Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. – 1937. – Bd. 81, pt. 2. – P. 972–973.

167. *Карелин В.Я.* Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. – М.: Машгиз, 1963. – 249 с.

168. *Ивченко В.М., Кулагин В.А., Немчин А.Ф.* Кавитационная технология. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1990. – 200 с.

169. *Кулагин В.А., Вильченко А.П., Кулагина Т.А.* Моделирование двухфазных суперкавитационных потоков: монография / под ред. В.И. Быкова. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2001. – 187 с.

170. *Балабышко А.М., Зимин А.И., Ружицкий В.П.* Гидромеханическое диспергирование. – М.: Наука, 1998. – 331 с.

171. Патент 2207450 Российская Федерация, МПК 7 F 15 D 1/02, F 24 J 3/00. Кавитатор гидродинамического типа / Л.Н. Бритвин, Т.В. Бритвина. – № 99113709/06; заявл. 24.06.1999; опубл. 27.06.2003.

172. Патент на полезную модель 29127 Российская Федерация, МПК 7 F 24 J 3/00, F 25 B 30/00. Кавитационно-вихревой теплогенератор / С.С. Кочкин, В.В. Атаманов, О.В. Коротков, А.В. Маркевич. – № 2002126114/20; заявл. 27.09.2002; опубл. 27.04.2003, Бюл. № 12.

173. Патент 2086303 Российская Федерация, МПК С 1 6 В 02 С 19/00. Кавитатор Мошконова / В.В. Мошконов. – № 94044544/03; заявл. 14.12.1994; опубл. 10.08.1997.

174. Патент 2144627 Российская Федерация, МПК С 1 7 F 15 D 1/02, F 24 J 3/00. Гидродинамический кавитационный аппарат / И.С. Медведев, В.М. Паршиков, Л.Н. Бритвин, В.И. Никитин, И.Ф. Пименов, С.Н. Чувашев. – № 98114517/06; заявл. 10.08.1998; опубл. 20.01.2000, Бюл. № 2.

175. Патент 2139454 Российская Федерация, МПК С 1 6 F 15 D 1/02, В 01 F 5/00. Устройство для воздействия на поток текучей среды / С.Б. Осипенко. – № 98100026/12; заявл. 08.05.1997; опубл. 10.10.1999, Бюл. № 28.

176. Патент 2164629 Российская Федерация, МПК С 1 7 F 15 D 1/02. Способ кавитации потока жидкости и устройство для его осуществления /



В.И. Иванников. – № 99120729/06; заявл. 04.10.1999; опубл. 27.03.2001, Бюл. № 9.

177. Патент 2016642 Российская Федерация, МПК С 1 5 В 01 F 7/00. Диспергатор. / Г.А. Сергеев, А.Н. Докучаев, Г.А. Коврижников, А.П. Щелбанов, А.В. Казачанский. – №4672572/26; заявл. 11.10.1990; опубл. 30.07.1994.

178. Патент 2126117 Российская Федерация, МПК С 1 6 F 24 J 3/00. Кавитатор для тепловыделения в жидкости / Л.В. Ларионов, И.И. Томин, В.Л. Петухов, Д.Е. Миронидис. – № 97118384/06; заявл. 10.11.1997; опубл. 10.02.1999.

179. Патент 2207450 Российская Федерация, МПК 7 F 15 D 1/02, F 24 J 3/00. Кавитатор гидродинамического типа / Л.Н. Бритвин, Т.В. Бритвина. – № 99113709/06; заявл. 24.06.1999; опубл. 27.06.2003.

180. *Радзюк А.Ю.* Методы и средства подготовки водоугольной суспензии для теплотехнических установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2005. – 17 с.

181. *Карпов Е.Г.* Новые способы приготовления водоугольного топлива // Академия энергетики: аналитика, идеи, проекты. – 2007. – № 4 (18). – С. 66–68.

182. *Ходаков Г.С.* Физико-химическая механика измельчения твердых тел // Коллоидный журнал. – 1998. – № 5. – С. 684–697.

183. *Хренкова Т.М.* Механохимическая активация углей. – М.: Недра, 1993.

184. *Ходаков Г.С.* Физико-химическая механика технологических процессов // Российский химический журнал. – 2000. – № 3. – С. 93–108.

185. Теплотехнический справочник. Т. 1 / под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. – 743 с.

186. *Михайлов Н.М., Шарков А.Т.* Физические свойства топлива. – М.: Энергия, 1972.

187. *Авдеева А.А., Белосельский Б.С., Краснов М.Н.* Контроль топлива на электростанциях. – М.: Энергия, 1973.

188. Теплотехнический справочник. Т. 2 / под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – 895 с.

189. *Рудно Н.М.* Лабораторные весы и точное взвешивание. – М.: Стандартиз, 1963. – 218 с.

190. *Сарахов А.И.* Весы в физико-химических исследованиях. – М.: Наука, 1968. – 226 с.

191. *Щедровицкий С.С., Машинцев Е.В., Моисеев Б.М.* Установка для микротермогравиметрического анализа // Заводская лаборатория. – 1959. – Т. 25, № 1. – С. 122–125.

192. *Алаев Г.П.* Комплексный термический анализ твердого топлива: учебное пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. лесотехн. акад., 1984. – 90 с.



193. *Евтушенко Е.А.* Разработка композитного топлива из торфа и низко-реакционных углей для использования в промышленной энергетике: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2003. – 145 с.

194. *Овчинников Ю.В., Луценко С.В., Евтушенко Е.А.* Физические процессы и механические эффекты в дезинтеграторах и кавитаторах при производстве ИКЖТ // Энергосистемы: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – Вып. 9. – С. 235–244.

195. *Ломовский О.И., Болдырев В.В.* Механохимия в решении экологических задач: анализ. обзор. – Новосибирск, 2006. – (Экология; вып. 79).

196. *Гладких К.В., Овчинников Ю.В., Луценко С.В.* Экспериментальное исследование физических характеристик воды при кавитации в механических кавитаторах // Сибирский научный вестник. – Новосибирск, 2007. – Т. 10. – С. 128–134.

197. *Rayleigh L.* On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity // Philosophical Magazine. Series 6. – 1917. – Vol. 34. – P. 94–98.

198. *Степанов Л.П., Чесноков Н.А.* Современное состояние техники измерения вязкости. – М.: Стандартгиз, 1959. – 216 с.

199. CWM in Japan. Vol. 2 / New Energy and Industrial Technology Development Organization. – Tokyo: NEDO, 1997. – 452 p.

200. Справочник машиностроителя. Т. 2 / под ред. Н.С. Ачеркана. – М.: Машгиз, 1961. – 740 с.

201. Исследование характеристик композиционного жидкого топлива с содержанием технического глицерина / Ю.В. Овчинников, С.В. Луценко, В.А. Моисеев, В.Г. Андриенко // Энергетика и теплотехника. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Вып. 12. – С. 162–168.

202. Исследование характеристик композиционного жидкого топлива с содержанием технического глицерина / Ю.В. Овчинников, С.В. Луценко, В.А. Моисеев, В.Г. Андриенко // Энергетика и теплотехника. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Вып. 12. – С. 162–168.

203. Основы практической теории горения / под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергия, 1973. – 260 с.

204. *Евтушенко Е.А., Овчинников Ю.В.* Система безразмерных критериев для процесса горения твердого топлива // Теплоэнергетика. Физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – Вып. 5. – С. 112–121.

205. *Евтушенко Е.А., Овчинников Ю.В., Пугач Л.И.* Определение реакционной способности твердого топлива // Теплоэнергетика. Физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – Вып. 5. – С. 164–170.



206. *Савоськин М.Ю., Овчинников Ю.В., Пак В.В.* Разработка критерия реакционной способности кускового твердого топлива как параметра качества топлива // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Вып. 8. – С. 262–268.
207. *Роддатис К.Ф.* Котельные установки. – М.: Энергия, 1977. – 413 с.
208. Теплотехнический справочник. Т. 2 / под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – 895 с.
209. *Кондратьев Г.М.* Тепловые измерения. – Л.: Машгиз, 1957. – 244 с.
210. *Мали В.И., Калинин А.Н., Сергеев С.А.* Исследование теплопроводности взрывных компактов медь-молибден // Физика горения и взрыва. – 2003. – Т. 39, № 1. – С. 123–127.
211. Экологическая безопасность искусственного композиционного жидкого топлива с добавлением технического глицерина, содержащего метанол / С.В. Луценко, Ю.В. Овчинников, Г.Г. Кувшинов, В.А. Моисеев, Г.В. Андриенко // Энергетика и теплотехника: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Вып. 8. – С. 140–153.
212. Оценка технико-экономической эффективности ТЭС с учетом инфляции / И.В. Бородихин, О.В. Боруш, Г.В. Ноздренко, П.А. Щинников // Энергетика и теплотехника: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – Вып. 11. – С. 91–94.
213. *Накоряков В.Е., Гасенко В.Г.* Кинетическая модель инфляции // Экономика и математические методы. – 2004. – Т. 40, № 1. – С. 129–134.
214. Практические рекомендации по оценке эффективности и разработке инвестиционных проектов и бизнес-планов в электроэнергетике (с типовыми примерами) / РАО «ЕЭС России», Науч. центр прикладных исследований. – Офиц. изд. – М., 1997. – 286 с.
215. *Карпович А.И., Терещенко О.В.* Оценка эффективности инвестиционных проектов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. – 86 с.
216. *Равич М.Б.* Эффективность использования топлива. – М.: Наука, 1997.
217. Техничко-экономическая эффективность энергоблоков ТЭС / В.С. Ларионов, Г.В. Ноздренко, П.А. Щинников, В.В. Зыков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 30 с.
218. *Клер А.М., Потанина Ю.М.* Сопоставление энергетической эффективности перспективных теплоэнергетических установок на твердом и газообразном топливе // Теплоэнергетика: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – С. 6–23.
219. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / под ред. В.В. Коссова, В.Н. Лившица, А.Г. Шахназарова. – Офиц. изд. (вторая редакция). – М.: Экономика, 2000. – 422 с.



220. Обоснование направлений развития пылеугольных ТЭЦ с новыми ресурсосберегающими технологиями / В.Г. Томилов, П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко и др. – Новосибирск: Наука, 2000. – 152 с.

221. Овчинников Ю.В., Луценко С.В. Техничко-экономическая эффективность использования ВУТ-ИКЖТ // Электросистемы, электростанции и их агрегаты: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – Вып. 10. – С. 147–160.

222. Евтушенко Е.А., Овчинников Ю.В. Система безразмерных критериев для процесса горения твердого топлива // Теплоэнергетика. Физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – Вып. 5. – С. 112–121.

223. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

224. Роддатис К.Ф. Котельные установки. – М.: Энергия, 1977. – 413 с.

225. Теплотехнический справочник. Т. 1 / под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. – 743 с.

226. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. – Л.: Машгиз, 1957. – 244 с.

227. Мали В.И., Калинин А.Н., Сергеев С.А. Исследование теплопроводности взрывных компактов медь-молибден // Физика горения и взрыва. – 2003. – Т. 39, № 1. – С. 123–127.

228. Соломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. 2. Стадия испарения // Горение и плазموхимия. – 2007. – Т. 5, № 3. – С. 189–198.

229. Штым А.Н., Штым К.А., Дорогов Е.Ю. Котельные установки с циклонными предтопками. – Владивосток: Изд. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. – 421 с.

230. Штым К.А. Совершенствование циклонно-вихревой технологии сжигания топлива: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04. – Красноярск, 2015. – 38 с.

231. Исследование процессов горения искусственного композитного жидкого топлива в циклонном предтопке / А.И. Цепенюк, Ю.В. Овчинников, Ю.В. Стрижко, С.В. Луценко // Энергетик. – 2011. – № 7. – С. 45–47.

232. Исследование воспламеняемости твердых топлив и ИКЖТ / Ю.В. Овчинников, А.И. Цепенюк, А.В. Шихотинов, Е.В. Татарникова // Доклады АН ВШ РФ. – 2011. – № 1 (16). – С. 117–126.

233. Цепенюк А.И., Овчинников Ю.В., Стрижко Ю.В. Исследование процессов горения ИКЖТ (искусственного композитного жидкого топлива) в циклонном предтопке // Сборник тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса «Энергетика в глобальном мире», Красноярск, 16–18 июня 2010 г. – Красноярск, 2009. – С. 370–371.



234. Приготовление и сжигание водоугольного топлива в различных топочных устройствах / А.И. Цепенюк, С.В. Луценко, Ф.А. Серант, Е.Г. Карпов // Proceedings 1<sup>th</sup> International Conference Thermal Power and Sustainable Development TENOR 2010, Ugljevik, Republic of Bosnia and Herzegovina, 21–23 November 2010. – Ugljevik, 2010. – P. 61–68.

235. Preparation of Coal-Water Slurry and power units for its combustion / A.I. Tsepenok, S.V. Lutsenko, Yu.V. Ovchinnikov, F.A. Serant // TERMOTekhnika: Scientific and technical journal of the Society of thermal engineers of Serbia: Belgrade, Serbia. – 2011. – Vol. 37(1). – P. 169–181.

236. Шихотинов А.В., Овчинников Ю.В., Цепенюк А.И. Стенд для экспериментального исследования сжигания ИКЖТ в топочно-горелочных устройствах и исследование сжигания топлива // XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: сб. тр.: в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – Т. 3. – С. 285–286.

237. Приготовление водоугольного топлива и технологии его сжигания / Ф.А. Серант, А.И. Цепенюк, Ю.В. Овчинников, С.В. Луценко, Е.Г. Карпов // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2011. – № 1 (6). – С. 95–101.

238. Патент 2466331 Российская Федерация, МПК F 23 D 1/02, F 23 Q 13/00, F 23 D 14/12. Растопочная угольная горелка / А.И. Цепенюк, Ф.А. Серант, А.Р. Квривишвили; патентообладатель ЗАО «ЗиО-КОТЭС». – № 2011143344/06; заявл. 26.10.11; опубл. 10.11.12.

239. Tsepenok A.I., Ovchinnikov Yu.V., Serant F.A. Calculating analysis of firing different composition artificial coal liquid fuels (ACLF) in the cyclone primary furnace / // Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Coal Combustion, Harbin, China, 17–20 July 2011. – Harbin, 2011. – P. 507–511.

240. Численные исследования сжигания композитного водоугольного топлива в котле типа ДКВр-20-13 / А.И. Цепенюк, Ю.В. Овчинников, С.В. Луценко и др. // VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива», Новосибирск, 12–16 ноября 2012 г.: сб. тр. – Новосибирск, 2012. – С. 102–109.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

КОМПАНИЯ  
ХОДАКОВА

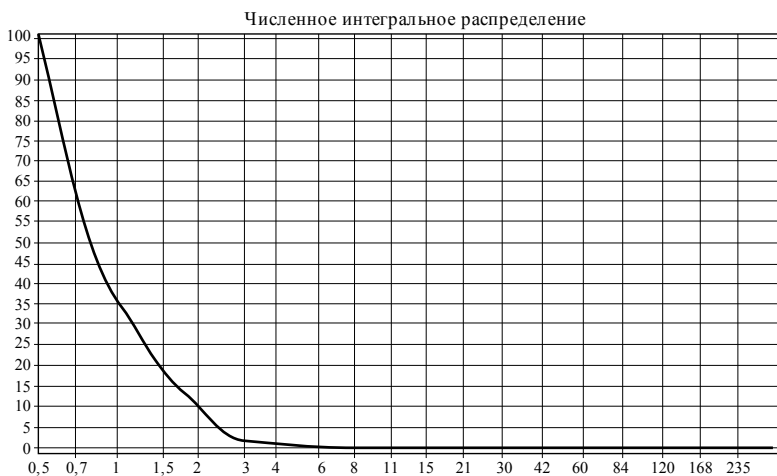
ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ  
СЕДИМЕНТОМЕТР

ФСХ - 5

Гранулометрический анализ № : 10

Образец : ВУС\_Б

Дата : 7 . 5 . 2008





КОМПАНИЯ  
ХОДАКОВА

## ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ СЕДИМЕНТОМЕТР

# ФСХ - 5

Гранулометрический анализ № : 10

Образец : ВУС\_Б

Дата : 7 . 5 . 2008

### Численное распределение

| Диаметр,<br>мкм | Интегральное<br>распределение,<br>% | Интервал,<br>мкм | Содержание<br>част., % | Дифференциальное<br>распределение,<br>%dD |
|-----------------|-------------------------------------|------------------|------------------------|---|
| 330             | 0                                   | 300...235        | 0                      | 0   |
| 235             | 0                                   | 235...168        | 0                      | 0   |
| 168             | 0                                   | 168...120        | 0                      | 0   |
| 120             | 0                                   | 120...84         | 0                      | 0   |
| 84              | 0                                   | 84...60          | 0                      | 0   |
| 60              | 0                                   | 60...42          | 0                      | 0   |
| 42              | 0                                   | 42...30          | 0                      | 0   |
| 30              | 0                                   | 30...21          | 0                      | 0   |
| 21              | 0                                   | 21...15          | 0                      | 0   |
| 15              | 0                                   | 15...11          | 0                      | 0   |
| 11              | 0                                   | 11...8           | 0,1                    | 0   |
| 8               | 0,1                                 | 8...6            | 0,1                    | 0,1                                       |
| 6               | 0,2                                 | 6...4            | 0,4                    | 0,2                                       |
| 4               | 0,7                                 | 4...3            | 0,4                    | 0,4                                       |
| 3               | 1                                   | 3...2            | 9,1                    | 9,1                                       |
| 2               | 10,1                                | 2...1,5          | 8,3                    | 16,6                                      |
| 1,5             | 18,4                                | 1,5...1          | 17                     | 34  |
| 1               | 35,4                                | 1...0,7          | 25,1                   | 83,6                                      |
| 0,7             | 60,5                                | 0,7...0,5        | 39,5                   | 197,4                                     |
| 0,5             | 100                                 | 0,5...0          | 0                      | 0   |





КОМПАНИЯ  
ХОДАКОВА

## ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ СЕДИМЕНТОМЕТР

# ФСХ - 5

Гранулометрический анализ № : 10

Образец : ВУС\_Б

Дата : 7 . 5 . 2008

### Статистика

|   |            |
|---|------------|
| Среднеарифметический диаметр частиц (мкм) | 17         |
| Среднеквадратичный диаметр частиц (мкм)   | 9,9        |
| Мода распределения (%)                    | {3; 5; 18} |
| Медиана распределения (мкм)               | 5          |
| Среднегармонический диаметр частиц (мкм)  | 0,1        |
| Удельная поверхность                      |            |
| ( $\text{м}^2/\text{см}^3$ )              | 45,738     |
| ( $\text{м}^2/\text{г}$ )                 | 31,543     |
| Среднее абсолютное отклонение (%)         | 11,1       |
| Среднеквадратичное отклонение (%)         | 5,8        |
| Относительное абсолютное отклонение (%)   | 65,4       |
| Относительное квадратичное отклонение (%) | 58,4       |
| Коэффициент вариации                      | 0,5        |
| Коэффициент асимметрии                    | 4,1        |



КОМПАНИЯ  
ХОДАКОВА

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ  
СЕДИМЕНТОМЕТР

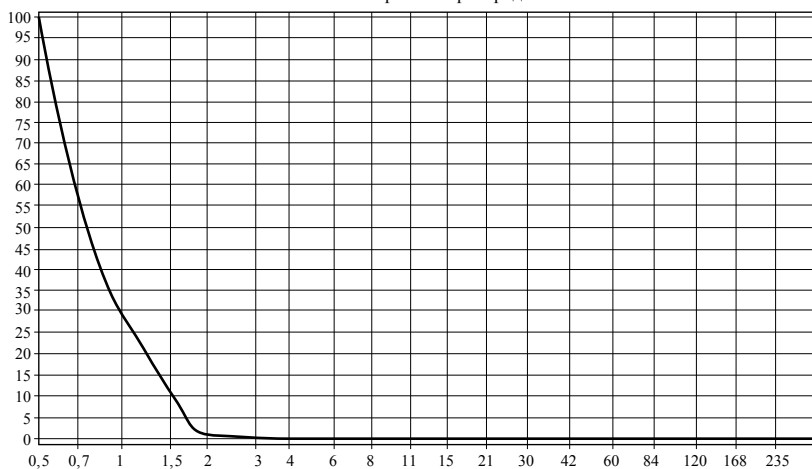
ФСХ - 5

Гранулометрический анализ № : 11

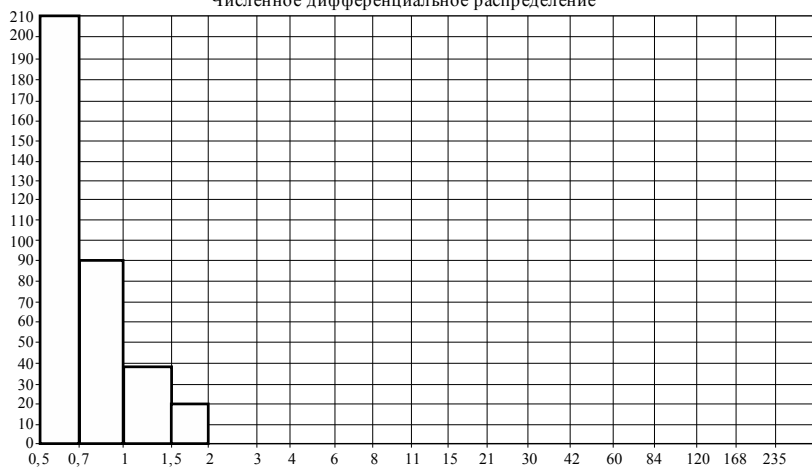
Образец : ВУС\_4

Дата : 7 . 5 . 2008

Численное интегральное распределение



Численное дифференциальное распределение





КОМПАНИЯ  
ХОДАКОВА

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ  
СЕДИМЕНТОМЕТР

ФСХ - 5

Гранулометрический анализ № : 11

Образец : ВУС\_4

Дата : 7 . 5 . 2008

Статистика

|   |          |
|---|----------|
| Среднеарифметический диаметр частиц (мкм) | 23,9     |
| Среднеквадратичный диаметр частиц (мкм)   | 4,1      |
| Мода распределения (%)                    | {2; 5; } |
| Медиана распределения (мкм)               | 1        |
| Среднегармонический диаметр частиц (мкм)  | 0,4      |
| Удельная поверхность                      |          |
| ( $\text{м}^2/\text{см}^3$ )              | 15,868   |
| ( $\text{м}^2/\text{г}$ )                 | 10,944   |
| Среднее абсолютное отклонение (%)         | 39,8     |
| Среднеквадратичное отклонение (%)         | 2,4      |
| Относительное абсолютное отклонение (%)   | 166,8    |
| Относительное квадратичное отклонение (%) | 58,4     |
| Коэффициент вариации                      | 0,1      |
| Коэффициент асимметрии                    | 313,6    |

КОМПАНИЯ  
ХОДАКОВАФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ  
СЕДИМЕНТОМЕТР

ФСХ - 5

Гранулометрический анализ № : 11

Образец : ВУС\_4

Дата : 7 . 5 . 2008

## Численное распределение

| Диаметр,<br>мкм | Интегральное<br>распределение,<br>% | Интервал,<br>мкм | Содержание<br>част., % | Дифференциальное<br>распределение,<br>%dD |
|-----------------|-------------------------------------|------------------|------------------------|---|
| 330             | 0                                   | 300...235        | 0                      | 0   |
| 235             | 0                                   | 235...168        | 0                      | 0   |
| 168             | 0                                   | 168...120        | 0                      | 0   |
| 120             | 0                                   | 120...84         | 0                      | 0   |
| 84              | 0                                   | 84...60          | 0                      | 0   |
| 60              | 0                                   | 60...42          | 0                      | 0   |
| 42              | 0                                   | 42...30          | 0                      | 0   |
| 30              | 0                                   | 30...21          | 0                      | 0   |
| 21              | 0                                   | 21...15          | 0                      | 0   |
| 15              | 0                                   | 15...11          | 0                      | 0   |
| 11              | 0                                   | 11...8           | 0                      | 0   |
| 8               | 0                                   | 8...6            | 0,1                    | 0   |
| 6               | 0,1                                 | 6...4            | 0,2                    | 0,1                                       |
| 4               | 0,3                                 | 4...3            | 0,3                    | 0,3                                       |
| 3               | 0,7                                 | 3...2            | 0,5                    | 0,5                                       |
| 2               | 1,1                                 | 2...1,5          | 10                     | 20  |
| 1,5             | 11,1                                | 1,5...1          | 19,3                   | 38,6                                      |
| 1               | 30,4                                | 1...0,7          | 27,4                   | 91,3                                      |
| 0,7             | 57,8                                | 0,7...0,5        | 42,2                   | 211,1                                     |
| 0,5             | 100                                 | 0,5...0          | 0                      | 0   |

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение .....   | 8  |
| <i>Глава 1. Водугольное топливо (ВУТ), его приготовление, искусственное композиционное жидкое топливо (ИКЖТ)</i> ..... | 15 |
| 1.1. Основные положения технологии ВУТ – ИКЖТ .....  | 15 |
| 1.1.1. Дисперсанты и стабилизаторы, их применение .....  | 17 |
| 1.1.2. Реологические характеристики ВУТ .....  | 20 |
| 1.1.3. Влияние крупности твердой фазы .....  | 22 |
| 1.1.4. Тиксотропное состояние ВУТ .....  | 26 |
| 1.2. Использование ВУТ в мире и современные технологии его производства .....  | 30 |
| 1.2.1. Мировое производство ВУТ .....  | 30 |
| 1.2.2. Производство и применение ВУТ в Китайской Народной Республике .....   | 31 |
| 1.2.3. Производство и применение ВУТ в Японии .....  | 33 |
| 1.2.4. Производство и применение ВУТ в Италии .....  | 41 |
| 1.2.5. Производство и применение ВУТ в Канаде .....  | 41 |
| 1.2.6. Производство и применение ВУТ в США .....   | 42 |
| 1.2.7. Производство и применение ВУТ в России .....  | 44 |
| 1.3. Искусственное композиционное жидкое топливо (ИКЖТ) .....  | 47 |
| 1.3.1. Новые технологии при производстве ВУТ .....   | 48 |
| 1.3.2. Активация компонентов при производстве ИКЖТ .....   | 49 |
| Выводы по главе 1 .....  | 53 |
| <i>Глава 2. Активация твердой и жидкой фазы. Дезинтеграторы и кавитаторы</i> .....                                     | 55 |
| 2.1. Физико-химические процессы при диспергации твердых тел .....  | 55 |
| 2.2. Физико-химические процессы при диспергировании угля .....   | 67 |



|   |            |
|---|------------|
| 2.3. Диспергирование твердых тел в механических дезинтеграторах .....   | 72         |
| 2.3.1. Дезинтегратор .....  | 73         |
| 2.4. Промышленные угольные дезинтеграторы .....   | 81         |
| 2.5. Активация жидкой среды в кавитаторах .....   | 85         |
| 2.5.1. Кавитация жидкости в потоке .....  | 85         |
| 2.5.2. Внешние характеристики гидродинамического кавитатора и внутренний процесс кавитации .....  | 97         |
| 2.5.3. Промышленные гидродинамические кавитаторы .....  | 102        |
| Выводы по главе 2 .....   | 116        |
| <i>Глава 3. Методика исследования технологии производства ИКЖТ и характеристик топлива .....</i>  | <i>117</i> |
| 3.1. Временные технические условия для ВУТ .....  | 117        |
| 3.2. Частная методика исследования ВУТ НИЛ ОАО «Новосибирсктеплоэлектропроект» и ООО «Радекс». ....   | 126        |
| 3.3. Унифицированная методика научно-исследовательского центра по утилизации угля (Япония) .....  | 129        |
| 3.4. Дериватографическое исследование ИКЖТ (ВУТ) .....  | 130        |
| 3.5. Определение стационарной стабильности по методу различий между максимальной и минимальной концентрацией (фирма «Ube Industries») ..... | 134        |
| 3.6. Определение стационарной стабильности (метод испытываемого сосуда), фирма «Japan COM» .....  | 136        |
| 3.7. Определение стационарной стабильности по методу измерения скорости седиментации (фирмы «JGC CWM» и «West Japan CWV») .....             | 138        |
| <i>Глава 4. Исследование технологии ИКЖТ .....</i>  | <i>145</i> |
| 4.1. Исследование крупности твердой фазы в ИКЖТ .....   | 145        |
| 4.2. Исследование реологических характеристик ИКЖТ .....  | 159        |
| 4.2.1. Общее исследование реологических характеристик композиционного жидкого топлива .....   | 159        |
| 4.2.2. Определение динамического коэффициента вязкости спомощью вискозиметра ротационного типа системы П.П. Волоровича .....                | 160        |
| 4.2.3. Тиксотропное состояние ИКЖТ .....  | 166        |



|   |            |
|---|------------|
| 4.2.4. Исследование вязкости ИКЖТ как неньютоновской жидкости .....   | 168        |
| 4.3. Исследование седиментационной устойчивости искусственного композиционного жидкого топлива .....                                      | 181        |
| 4.4. Распыливание ИКЖТ форсунками .....   | 184        |
| 4.4.1. Пневматические форсунки для ВУТ-ИКЖТ .....   | 184        |
| 4.4.2. Конструкция форсунки .....   | 185        |
| 4.4.3. Стенд для пневмогидравлических испытаний форсунок на модельном и натурном компонентах .....  | 187        |
| 4.4.4. Испытательный стенд для изучения распыла топлива форсунками .....  | 190        |
| 4.4.5. Выбор модельного режима воздуха при испытаниях форсунок с воздушным противодавлением .....   | 190        |
| 4.4.6. Порядок проведения испытаний .....   | 192        |
| 4.4.7. Результаты испытаний .....   | 193        |
| Выводы по главе 4 .....   | 196        |
| <i>Глава 5. Техничко-экономическая эффективность использования ИКЖТ .....</i>   | <i>197</i> |
| 5.1. Методические положения по оценке эффективности инвестиционных проектов .....   | 197        |
| 5.1.1. Инвестиционный проект и инвестиции .....   | 197        |
| 5.1.2. Эффективность инвестиционных проектов .....  | 201        |
| 5.1.3. Особенности оценки инвестиционных проектов в теплоэнергетике .....   | 212        |
| 5.2. Эффективность замещения мазута искусственным композиционным жидким топливом .....  | 215        |
| 5.2.1. Расчет эффективности инновационного проекта модернизации ОП – котельной завода Тепловозоремонтного оборудования, г. Павлодар ..... | 216        |
| 5.2.2. Описание существующего в АО «Алга А» оборудования .....  | 219        |
| 5.2.3. Выбор состава ИКЖТ .....   | 219        |
| 5.3. Проектные решения .....  | 221        |
| 5.4. Результаты исследования зольного остатка ИКЖТ из углей АО «Алга-А» .....   | 222        |
| Вывод по разделам 5.1 – 5.4 .....   | 223        |



|   |     |
|---|-----|
| 5.5. Расчет эффективности ИП «Алга-А» .....   | 225 |
| 5.6. Полный инновационный проект для НоВЭЗа (2003 г.) .....   | 228 |
| 5.7. Финансовая привлекательность в случае строительства завода<br>для производства ИКЖТ на продажу ..... | 229 |
| Выводы по главе 5 .....   | 232 |
| <i>Глава 6. Сжигание ИКЖТ в циклонных предтопках</i> .....  | 233 |
| 6.1. Воспламенение ИКЖТ .....   | 233 |
| 6.1.1. Методика исследования .....  | 237 |
| 6.1.2. Критерий воспламеняемости .....  | 241 |
| 6.2. Исследование сжигания ИКЖТ (ТД ВУС) в циклонном пред-<br>топке .....                                 | 248 |
| 6.2.1. Методика исследования .....  | 250 |
| 6.2.2. Уникальный опытный исследовательский стенд для<br>сжигания ТД ВУС в ЦП .....                       | 256 |
| 6.2.3. Результаты исследований .....  | 264 |
| Выводы по главе 6 .....   | 268 |
| Заключение .....  | 270 |
| Библиографический список .....  | 275 |
| Приложение .....  | 294 |



## CONTENTS

|  |           |
|--|-----------|
| Introduction .....   | 8         |
| <i>Chapter 1. Coal-water Fuel (CWF) and Its Preparation; Prepared Composite Liquid Fuel (PCLF) .....</i> | <i>15</i> |
| 1.1. The main statements of the CWF-PCLF technology .....  | 15        |
| 1.1.1. Dispersants and stabilizers, their application .....  | 17        |
| 1.1.2. Rheological characteristics of CWF .....  | 20        |
| 1.1.3. The influence of solid phase fineness .....   | 22        |
| 1.1.4. The CWF thixotropic state .....   | 26        |
| 1.2. The use of CWF in the world and modern technologies of its production .....                         | 30        |
| 1.2.1. World production of CWF .....   | 30        |
| 1.2.2. Production and application of CWF in the People's Republic of China .....                         | 31        |
| 1.2.3. Production and application of CWF in Japan .....  | 33        |
| 1.2.4. Production and application of CWF in Italy .....  | 41        |
| 1.2.5. Production and application of CWF in Canada .....   | 41        |
| 1.2.6. Production and application of CWF in the USA .....  | 42        |
| 1.2.7. Production and application of CWF in Russia .....   | 44        |
| 1.3. Prepared composite liquid fuel (PCLF) .....   | 47        |
| 1.3.1. New technologies in CWF production .....  | 48        |
| 1.3.2. Component activation in PCLF production .....   | 49        |
| Conclusions .....  | 53        |
| <i>Chapter 2. The Activation of Liquid and Solid Phases. Disintegrators and the Cavitator .....</i>      | <i>55</i> |
| 2.1. Physical and chemical processes in the dispersing process of solid bodies .....                     | 55        |



|   |            |
|---|------------|
| 2.2. Physical and chemical processes in the dispersing process of coal.....   | 67         |
| 2.3. Dispersing of solid bodies in mechanical disintegrators .....  | 72         |
| 2.3.1. Disintegrators .....   | 73         |
| 2.4. Industrial coal disintegrators .....   | 81         |
| 2.5. The activation of liquid media in cavitators .....   | 85         |
| 2.5.1. The cavitation of liquids in the flow .....  | 85         |
| 2.5.2. External characteristics of the hydrodynamic cavitator and<br>internal process of cavitation .....   | 97         |
| 2.5.3. Industrial hydrodynamic cavitators .....   | 102        |
| Conclusions .....   | 116        |
| <i>Chapter 3. Methods of Studying the PCLF Production Technology and Fuel<br/>    Characteristics .....</i>   | <i>117</i> |
| 3.1. Temporal specifications for CWF .....  | 117        |
| 3.2. The private research technique of CWF proposed by Novosibirsk<br>teploproekt PLC and Radeks Ltd companies .....  | 126        |
| 3.3. The unified procedure of the research center for coal recovery<br>(Japan) .....  | 129        |
| 3.4. The derivational-graphical research into PCLF (CWF) .....  | 130        |
| 3.5. The determination of stationary stability between the maximal and<br>minimal concentration by the difference method (the UbeIndustries<br>company) ..... | 134        |
| 3.6. The determination of stationary stability (the method of the tested<br>vessel) proposed by the Japan COM company .....                                   | 136        |
| 3.7. The determination of stationary stability by the method of sedimen<br>tation rate measurement proposed by JGC CWM and WestJapan<br>CWV companies .....   | 138        |
| <i>Chapter 4. Research into the PCLF Technology .....</i>   | <i>145</i> |
| 4.1. Research into the fineness of the PCLF solid phase.....  | 145        |
| 4.2. Research into the PCLF rheological characteristics .....   | 159        |
| 4.2.1. General research into rheological characteristics of compo-<br>site liquid fuels .....   | 159        |
| 4.2.2. The determination of the dynamic viscosity coefficient<br>by the Volorovich rotating type viscometer .....   | 160        |
| 4.2.3. The PCLF thixotropic state .....   | 166        |



|   |     |
|---|-----|
| 4.2.4. The research into the viscosity of PCLF as a non-Newtonian liquid .....  | 168 |
| 4.3. Research into the PCLF sedimentation stability .....   | 181 |
| 4.4. PCLF spraying by atomizing nozzles .....   | 184 |
| 4.4.1. Pneumatic atomizing nozzles for CWF and PCLF .....   | 184 |
| 4.4.2. The atomizing nozzle design .....  | 185 |
| 4.4.3. The stand for atomizer nozzle hydro-pneumatic testing on model and full-scale components .....   | 187 |
| 4.4.4. The test stand for studying fuel spraying by atomizer nozzles ...  | 190 |
| 4.4.5. A choice of a model mode air regime in testing atomizer nozzles with the air back pressure .....   | 190 |
| 4.4.6. The test routine .....   | 192 |
| 4.4.7. Test results .....   | 193 |
| Conclusions .....   | 196 |
| <i>Chapter 5. Technical and Economic Efficiency of PCLF Use</i> .....   | 197 |
| 5.1. The methodology of estimating the investment project efficiency .....  | 197 |
| 5.1.1. Investment projects and investments .....  | 197 |
| 5.1.2. Investment project efficiency .....  | 201 |
| 5.1.3. Peculiarities of investment project evaluation in heat-power engineering .....   | 212 |
| 5.2. The efficiency of black oil substitution for a prepared composite liquid fuel .....  | 215 |
| 5.2.1. The calculation of the innovation project efficiency for updating the boiler room at the diesel locomotive repair equipment plant in Pavlodar city ..... | 216 |
| 5.2.2. The description of the equipment available in the Alga A joint-stock company .....   | 219 |
| 5.2.3. The choice of the PCLF composition .....   | 219 |
| 5.3. Design decisions .....   | 221 |
| 5.4. The results of investigation of the PCLF ash residue from the coals of the Alga A joint-stock company .....  | 222 |
| Conclusions (5.1 – 5.4) .....   | 223 |
| 5.5. The calculation of the Alga A joint-stock company efficiency (tables 5.3 – 5.5) .....  | 225 |
| 5.6. The entire innovation project considered for NoVEZa (2003) .....   | 228 |



---

|  |     |
|--|-----|
| 5.7. Financial attractiveness is high even in the case of building a plant to produce PCLFs for sale ..... | 229 |
| Conclusions .....  | 232 |
| <i>Chapter 6. PCLF Burning in Cyclone Furnace Extensions</i> .....   | 233 |
| 6.1. PCLF ignition .....   | 233 |
| 6.1.1. Research methods .....  | 237 |
| 6.1.2. The ignitability criterion .....  | 241 |
| 6.2. Research into PCLF burning (TD CWF) in the cyclone furnace extension .....                            | 248 |
| 6.2.1. Research methodology .....  | 250 |
| 6.2.2. A unique research test stand for burning TD CWF in the cyclone furnace extension .....              | 256 |
| 6.2.3. Research results .....  | 264 |
| Conclusions .....  | 268 |
| General conclusion .....   | 270 |
| References .....   | 275 |
| Appendix .....   | 294 |

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Овчинников Юрий Витальевич  
Бойко Екатерина Евгеньевна**

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ  
ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ**

**Монография**

Редактор *И.Л. Кескевич*  
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*  
Художественный редактор *А.В. Ладыжская*  
Корректор *И.Е. Семенова*  
Компьютерная верстка и рисунки *С.И. Ткачева*

Подписано в печать 29.12.2016  
Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная  
Уч.-изд. л. 19,25. Печ. л. 19,25  
Тираж 3000 экз. (1-й з-д – 1–100 экз.)  
Изд. № 91/16. Заказ № 159

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Издательство Новосибирского государственного  
технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Тел. (383) 346-31-87  
E-mail: office@publish.nstu.ru

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20