

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра энергетики

В. А. Коротинский, А. Е. Андрейчик, С. И. Сеница

ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

*Методические указания
к лабораторным работам по дисциплине «Топливо и процессы
горения в теплоэнергетических системах»
для студентов специальности
1-74 06 05 02 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства
(теплоэнергетика)*

Минск
БГАТУ
2010

УДК 621.039.542(07)
ББК 31.35я7
К68

*Рекомендовано научно-методическим советом
агроэнергетического факультета БГАТУ.
Протокол № 10 от 15 июня 2010 г.*

Рецензенты:
кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологии
БГАТУ *И. Б. Дубодел*;
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Металлургические технологии» БНТУ *И. А. Трусова*

Коротинский, В. А.
К68 Основные теплотехнические характеристики и процессы
горения топлива : методические указания / В. А. Коротинский,
А. Е. Андрейчик, С. И. Сеница. – Минск : БГАТУ, 2010.– 56 с.
ISBN 978-985-519-330-3.

УДК 621.039.542(07)
ББК 31.35я7

ISBN 978-985-519-330-3

© БГАТУ, 2010

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Студент допускается к выполнению лабораторных работ после ознакомления с правилами техники безопасности в лабораториях кафедры и с разрешения преподавателя (лаборанта).

В процессе подготовки к лабораторной работе необходимо изучить методические указания, привести на бланке отчета схему лабораторной установки и таблицу для записи результатов измерений.

При выполнении лабораторных работ студент должен действовать в строгом соответствии с методическими указаниями и не допускать самовольных действий с приборами, пускорегулирующей аппаратурой и другими элементами установок.

Запрещается:

- включать и выключать лабораторные установки без разрешения преподавателя;
- прикасаться к элементам оборудования, которые могут находиться под напряжением;
- прикасаться к нагретым поверхностям и движущимся частям оборудования;
- облокачиваться или ставить ноги на оборудование.

Студент должен знать, где находится аппаратура, с помощью которой включается (выключается) оборудование, производится снятие показаний.

По окончании выполнения экспериментальной части лабораторной работы или изучения элементов систем необходимо показать преподавателю заполненную таблицу результатов измерений, схемы и записи.

При нарушении правил техники безопасности студент отстраняется от выполнения лабораторных работ и может быть допущен к дальнейшему их выполнению только после собеседования с преподавателем по правилам выполнения работ.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Цель работы – изучить физико-химические процессы горения топлива.

Общие сведения

Горение – это химическая реакция окисления, сопровождающаяся выделением теплоты и света. Для возникновения горения требуется наличие трех факторов: горючего вещества, окислителя и источника загорания. Окислителями могут быть кислород, хлор, фтор, бром, йод, окиси азота и другие. Кроме того, необходимо, чтобы горючее вещество было нагрето до определенной температуры и находилось в определенном количественном соотношении с окислителем, а источник загорания имел определенную энергию.

Сущность горения заключается в нагревании источником загорания горючего материала до начала его теплового разложения. Когда горючий материал разлагается, он выделяет пары углерода и водорода, которые, соединяясь с кислородом воздуха в реакции горения, образуют двуокись углерода, воду и выделяют много тепла, а также окись углерода (угарный газ) и сажу.

Процесс возникновения горения подразделяется на несколько видов.

Вспышка – быстрое сгорание горючей смеси, не сопровождающееся образованием сжатых газов.

Возгорание – возникновение горения под воздействием источника загорания.

Условно источники загорания можно разделить на 4 вида:

- открытый огонь в виде тлеющей сигареты, зажженной спички, конфорки газовой плиты, керосинового фонаря, лампы;
- теплоэлектронагревательные приборы;
- искры от сварочных аппаратов;
- самовозгорание веществ и материалов.

Все горючие вещества и материалы имеют свою температуру воспламенения.

Воспламенение – процесс возникновения горения, происходящий в результате нагрева горючего вещества источником загорания.

Температура воспламенения горючих веществ и материалов колеблется от отрицательных (бензин, керосин, лаки, краски) до положительных величин и не превышает для большинства твердых материалов 300 °С.

Самовоспламенение – самовозгорание, сопровождается появлением пламени.

Многим твердым веществам и материалам присуще самовозгорание.

Самовозгорание – явление скачкообразного увеличения инертности реакции, приводящей к началу горения вещества (материала, смеси) при отсутствии видимого источника зажигания. Сущность этого процесса заключается в том, что при продолжительном воздействии тепла на материал происходит накопление его в материале и при достижении температуры самонагрева возникают тление или воспламенение. Накопление тепла может продолжаться от нескольких дней до нескольких месяцев.

Для большинства горючих веществ процесс самовозгорания выглядит как совокупность тепловой, химической и микробиологической реакций.

Температура самовозгорания торфа и бурого угля составляет 50–60 °С, хлопка – 120 °С, бумаги – 100 °С, линолеума – 80 °С (тепловое самовозгорание под действием постоянного источника нагревания).

Химическое самовозгорание связано со способностью веществ и материалов вступать в химическую реакцию с воздухом или другими окислителями при нормальных условиях с выделением теплоты, достаточной для их возгорания.

Самовозгораются промышленная ветошь и фосфор на воздухе, легковоспламеняющаяся жидкость при контакте с марганцовкой, древесные опилки при контакте с кислотами.

Микробиологическое самовозгорание связано с деятельностью мельчайших насекомых. Они в огромном количестве размножаются в спрессованных материалах, поедают все органическое и там же погибают, вместе со своим разложением выделяя определенную температуру, которая накапливается внутри материала. Наиболее характерным примером является самовозгорание прошлогодних скирд сена.

Процесс горения твердых, жидких и газообразных веществ включает фазы: окисление, самовоспламенение и горение.

По степени горючести вещества делятся на: горючие (сгораемые), трудногорючие (трудносгораемые) и негорючие (несгораемые).

К горючим относятся такие вещества, которые при воспламенении посторонним источником продолжают гореть и после его удаления.

К трудногорючим относятся такие вещества, которые не способны распространять пламя и горят лишь в месте воздействия источника зажигания.

Негорючими являются вещества, не воспламеняющиеся даже при воздействии достаточно мощных источников зажигания.

Горючие вещества могут быть в трех агрегатных состояниях: жидком, твердом и газообразном. Большинство горючих веществ независимо от агрегатного состояния при нагревании образует газообразные продукты, которые при смешении с воздухом, содержащим определенное количество кислорода, образуют горючую среду.

Из горючих газов и пыли образуются горючие смеси при любой температуре, в то время как твердые вещества и жидкости могут образовать горючие смеси только при определенных температурах.

Горение твердых топлив происходит через ряд стадий накладывающихся друг на друга:

- нагрев;
- испарение влаги;
- выделение летучих и образование кокса;
- горение летучих и образование кокса.

Определяющей является стадия горения кокса, т. е. углерода, поскольку углерод является главной горючей составляющей почти всех натуральных твердых топлив. Кроме этого, стадия горения кокса продолжительнее всех остальных ($\approx 90\%$). Именно эта стадия создает тепловые условия для всех остальных стадий. В целом горение твердых топлив является сложным физико-химическим процессом, включающим в себя подвод кислорода к поверхности топлива, химическую реакцию и удаление продукта реакции.

Твердое топливо сжигается в слое (рис. 1.1). Под слоем загруженного топлива находится горящий кокс. После прогрева поступившего топлива происходит испарение влаги и летучих веществ. Одновременно образуется кокс, опускающийся в нижний слой взамен выгоревшего в нем кокса. С раскаленных кусочков кокса каплями стекает вниз шлак, затвердевая на колосниковой решетке, откуда периодически его удаляют.

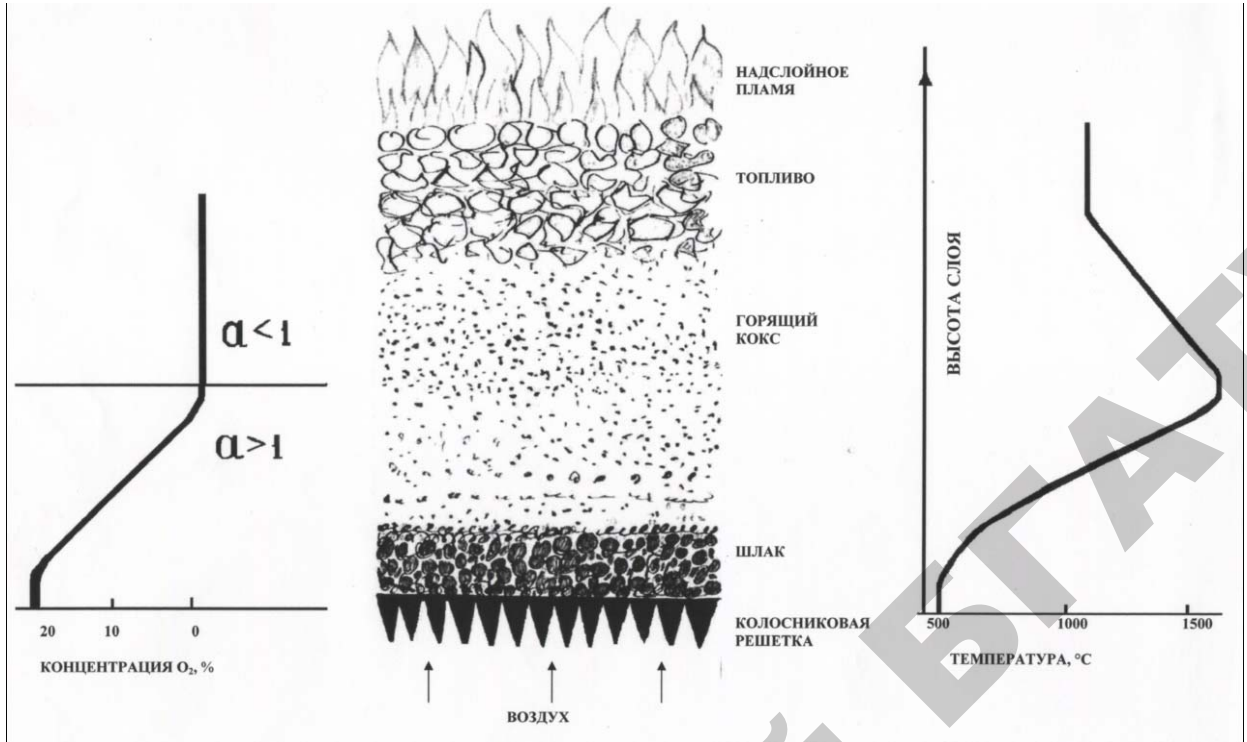


Рис. 1.1. Структура горящего слоя топлива

РЕПОЗИТОРИЙ БГУ

Для разрушения слоя шлака, образующегося на поверхностях горения и сильно его затрудняющего, появляется необходимость шуровать (тормозить) слой. Горение происходит как в слое топлива, так и в надслойном пространстве, куда выделяются горючие газы. В нижней части слоя кокса одновременно образуются CO и CO_2 . Эта зона, где кислород воздуха принимает участие в реакциях окисления, называется *окислительной (кислородной) зоной*.

К концу окислительной зоны концентрация O_2 снижается до 1...2 %, а концентрация CO_2 достигает максимума.

Над окислительной зоной находится восстановительная зона, в которой кислород практически отсутствует. CO_2 здесь взаимодействует с раскаленным углеродом C , с образованием CO , что приводит к уменьшению содержания CO_2 и увеличению CO по высоте восстановительной зоны. В восстановительной зоне возможна также экзотермическая реакция разложения водяных паров с образованием еще одного горючего газового компонента – водорода. Образование горючих газов из топлива CO и H_2 составляет процесс газификации топлива. Температура в окислительной зоне резко возрастает по высоте и достигает максимальных значений там, где наибольшая концентрация CO_2 . В восстановительной зоне температура меньше, чем в окислительной.

О скорости горения топлива судят по тепловому напряжению топочного пространства ($МВт/м^2$). Эта величина определяется

$$q_V = \frac{Q}{V_T},$$

где Q – количество выделяемой теплоты в секунду, $МВт$;

V_T – объем зоны горения, $м^3$; для камерных топок q_V равно 0,2–0,4 $МВт/м^2$; циклонных топок – 6,5–12 $МВт/м^2$; топок печей – 0,35–1,2 $МВт/м^2$.

Методика выполнения работы

При исследовании процесса горения требуется наличие горючего вещества, окислителя и источника загорания. Оно состоит в том, что навеска топлива прокаливается при свободном доступе воздуха (сгорает) в открытом тигле при температуре 850 ± 25 °С.

Лабораторная установка (рис. 1.2) состоит из муфельной электрической печи 1, в которой предусмотрены два отверстия для подвода воздуха и удаления продуктов сгорания. Температура внутри печи измеряется хромель-алюмелевой (ХА) термопарой 4 с потенциометром 5. В системе нагрева предусматривается двухпозиционное автоматическое поддержание соответствующей температуры после выхода установки на режим. Лабораторная установка укомплектована тиглями 2.

Работа выполняется в следующей последовательности.

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, приборами.

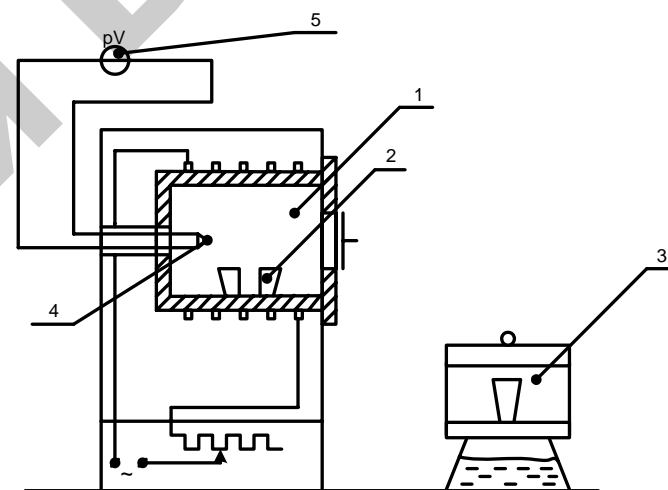


Рис.1.2. Схема муфельной печи

2. Включить муфельную печь в электрическую сеть и разогреть до температуры 850 ± 25 °С.

3. Тщательно перемешать исследуемое топливо в открытой банке.

4. Измерить температуру в печи. При соответствующей температуре открыть переднюю дверцу муфеля и поместить тигли с навесками топлива на край муфеля.

5. Наблюдать за реакцией, происходящей с топливом.

6. Сделать выводы и заключение о процессах горения топлива.

Контрольные вопросы

1. Что такое горение? Перечислите факторы горения.
2. Назовите виды горения.
3. Охарактеризуйте явление микробиологического самовозгорания.
4. Как различаются вещества по степени горючести?
5. Какова структура горящего слоя топлива?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ТОПЛИВА

Цель работы – усвоить классификацию и различный состав топлива, основные его элементы и теплотехнические характеристики, научиться определять влажность топлива экспериментально, определить теплотехнические, экономические и экологические недостатки влажного топлива.

Общие сведения

Топливо – умышленно сжигаемые горючие вещества с целью получения большого количества теплоты. Эти вещества одновременно являются ценным сырьем для химической промышленности. Поэтому целесообразность использования их в качестве топлива предварительно определяется технико-экономическим расчетом с учетом запасов, свойств, уровня развития техники и экономики на данном этапе.

По агрегатному состоянию топливо подразделяется на твердое, жидкое и газообразное, по способу применения – на естественное и искусственное, полученное переработкой естественного.

Любое топливо состоит из горючих элементов и негорючих примесей (балласта). К горючим элементам твердого и жидкого топлива относятся углерод, водород и горючая (летучая) сера. Внутренний балласт топлива составляют кислород и азот, внешний балласт – минеральные негорючие примеси и влага.

Топливо, которое сжигается в технических устройствах без предварительной обработки, т. е. содержит горючие элементы и балласт, называется рабочей массой. Состав топлива задается в процентах по массе и определяется следующим соотношением:

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S_n^P + A^P + W^P = 100 \%$$

Составом топлива в виде рабочей массы пользуются при выполнении теплотехнических расчетов топок котлоагрегатов, печей, а также камер сгорания различных двигателей.

При полном отсутствии влаги в топливе его состав выражается в виде сухой массы:

$$C^C + H^C + O^C + N^C + S_n^C + A^C = 100 \%$$

Состав топлива без внешнего балласта ($A^P + W^P$) называется горючей массой:

$$C^G + H^G + O^G + N^G + S_n^G = 100 \%$$

На практике наиболее часто изменяется внешний балласт топлива (зольность, влажность). Поэтому горючая масса – наиболее стабильный состав топлива.

Характеристика основных элементов топлива

Углерод и водород – самые ценные горючие компоненты топлива.

Углерод при полном сгорании выделяет 33,65 МДж теплоты на 1 кг массы. Его содержание в горючей массе различных видов топлива составляет более 50 % и возрастает с увеличением геологического возраста топлива. Например, в мазуте содержание углерода составляет 86–88 %.

Водород при полном сгорании образует воду, поэтому экологически является самым чистым горючим компонентом топлива. При его сгорании выделяется примерно 141,5 МДж теплоты на 1 кг водорода. С увеличением геологического возраста топлива содержание водорода уменьшается от 6 до 2 %. Частично водород в топливе находится в связанном виде, образуя внутреннюю влагу топлива, что несколько снижает его тепловую ценность как горючего элемента. Однако, водород играет основную роль в образовании летучих веществ, выход которых является одной из основных теплотехнических характеристик топлива.

Кислород и азот составляют внутренний балласт топлива, потому что снижают содержание в нем горючих элементов. С увеличением возраста топлива содержание кислорода уменьшается, например, от 42 % у древесины до 2 % у антрацита. Кислород химически связывает часть водорода в топливе, тем самым обесценивая его. Содержание азота в горючей массе различных видов топлива незначительно и составляет 1 ÷ 3 %. Однако и такое малое количество азота в топливе является весьма вредным из-за повышенной токсичности образующихся при высокотемпературном сжигании топлива (более 1 100 °С) оксидов азота (NO , NO_2).

Сера топлива в виде органических соединений и колчедана (FeS_2 , $CuFeS_2$) образует горючую или летучую серу (Sn). Горючая

сера при полном сгорании (до образования SO_2) выделяет 9 МДж теплоты на 1 кг серы. В топливе содержится также негорючая сера или сульфатная в виде различных химических соединений – сульфатов ($CaSO_4$, $MgSO_4$, Na_2SO_4 и т. п.). Эта сера входит в состав негорючих примесей топлива (A^P). Содержание серы в твердом топливе составляет 4–9 %, в мазуте – 0,2–2,5 %. Любая сера обесценивает топливо и снижает его качество. Продукты сгорания горючей серы – сернистый газ (SO_2) и серный ангидрид (триоксид серы) SO_3 – крайне токсичны, вызывают коррозию и разрушение металлических конструкций топочных устройств и газоходов. Поэтому серу нередко относят к балласту топлива.

Влага – внешний балласт топлива, составляет от 1 до 50 % рабочей массы различных видов топлива. Количество влаги в топливе зависит от геологического возраста, химической природы, условий залегания, добычи, транспортировки и хранения. Влага топлива бывает двух видов: внешняя (воздушная) и равновесная (гигроскопическая). Внешняя – смачивает поверхность кусков топлива, равновесная – заполняет поры и капилляры. Для этой влаги характерна физико-механическая связь с материалом. Внешняя влага удаляется из топлива при любой температуре до установления равновесия между парами влаги в топливе и окружающем воздухе при данных условиях.

Топливо без воздушной влаги называют воздушно-сухим или аналитической пробой.

С этим составом в лаборатории проводят технический анализ топлива, а мы будем определять влажность топлива. Содержание внешней влаги определяют высушиванием навески топлива на воздухе.

Влага, остающаяся в аналитической пробе при точно выдержанной температуре 20 °С (± 1 °С) и относительной влажности топлива 65 % (± 5 %), удаляемая при температуре 102–105 °С, называется гигроскопической. Для этой влаги характерна более прочная физико-химическая связь, обусловленная действием абсорбционных и осмотических сил в капиллярах и порах топлива. Однако, после удаления гигроскопической влаги в топливе еще остаются гидратная (кристаллизационная) влага и коллоидная (осмотическая).

Влага, как и зола, теплотехнически, экономически и экологически обесценивает топливо:

– уменьшает содержание горючих элементов, выход летучих веществ и величину теплоты сгорания топлива. При этом (по сравнению с золой) дополнительная теплота затрачивается на испарение влаги;

– увеличивает затраты труда и ресурсов на всех этапах подготовки топлива к использованию, приводит к смерзанию или к возможности самовозгорания соответственно зимой или летом;

– увеличивает объем продуктов сгорания, загрязняющих окружающую среду и повышающих материалоемкость коммуникаций и энергетические затраты на тяго–дутьевые устройства;

– повышает теплопотери с уходящими газами, снижая КПД топок.

Методика выполнения работы

Экспериментально влажность топлива определяется путем сушки его навески в сушильном шкафу при постоянной температуре 101–110 °С до полного испарения влаги. Затем по убыли массы навески рассчитывается влажность.

Данное значение температуры сушки обусловлено тем, что в этих условиях парциальное давление водяных паров в топливе превышает их парциальное давление в окружающей среде (атмосферном воздухе). Это способствует интенсивному удалению влаги из топлива.

Превышение указанной температуры сушки влечет за собой неконтролируемое окисление и разложение органических веществ с выделением летучих компонентов, что искажает экспериментальные результаты и поэтому недопустимо.

Лабораторная установка (рис. 2.1) состоит из электрического сушильного шкафа 1 с терморегулятором и отверстиями для естественной вентиляции, бюксов 2 с навесками топлива, эксикатора 3 с химическим реактивом, поглощающим воду. Термометр 4 предназначен для измерения и контроля за температурой внутри сушильного шкафа.

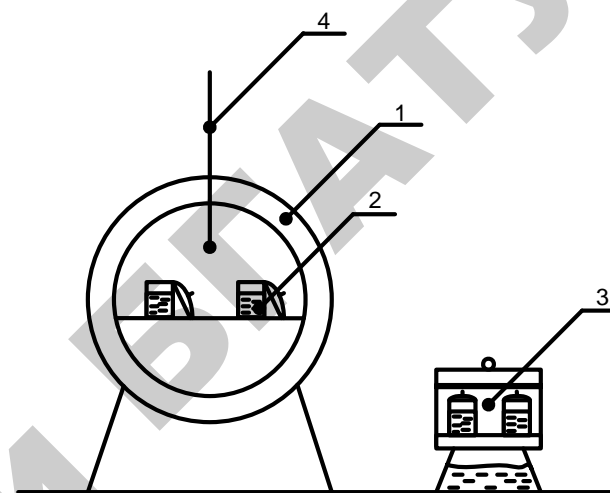


Рис. 2.1. Сушильный шкаф

Работа выполняется в следующей последовательности.

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, используемыми приборами и принадлежностями, инструкцией по взвешиванию на весах. Вместе с преподавателем проверить работоспособность весов. Взвешивание выполнить не менее 3-х раз.

2. Включенный в электрическую сеть сушильный шкаф разогреть до температуры 105–110 °С.

3. Подготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерений (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Результаты измерений

Номера бюксов	Масса бюкса, г			
	Пустого с крышкой М1	С навеской топлива М2	После I-ой сушки М3	После II-ой сушки М4

Контрольные вопросы

1. Дайте определение топлива.
2. Приведите классификацию и состав топлива.
3. Назовите и охарактеризуйте горючие элементы топлива.
4. Что такое внутренний и внешний балласты топлива?
5. Приведите основные теплотехнические характеристики топлива.
6. Укажите теплотехнические, экономические и экологические недостатки влажного топлива.

4. Взвесить пустые бюксы с крышками и записать значение масс M_1 в таблицу 2.1.

Одновременно исследовать две навески топлива!

5. Тщательно перемешать исследуемое топливо в открытой банке. Вместе с бюксом и крышкой отобранную навеску топлива взвесить на весах. При этом масса навески топлива должна быть равна 1–2 г. Записать значение массы в таблицу 2.1 (M_2).

6. Измерить температуру в сушильном шкафу. При соответствующей температуре приоткрыть крышки бюксов с навесками топлива и быстро поместить в сушильный шкаф. Зафиксировать время и выдерживать бюксы в шкафу в течение 1 часа.

7. После сушки бюксы с навесками осторожно удалить из сушильного шкафа и охлаждать на воздухе в течение 2-х минут, а затем в эксикаторах – до комнатной температуры. Взвесить и записать массы бюксов с навесками топлива после 1-ой сушки – M_3 (табл. 2.1).

8. При той же температуре в сушильном шкафу произвести контрольную (2-ю) сушку в течение 30 минут с последующим рассмотренным выше охлаждением и взвешиванием. Записать значение массы M_4 в таблицу 2.1.

9. Контрольные просушки повторяют до тех пор, пока убыль массы каждой из навесок не будет менее 0,001 г.

Обработка экспериментальных данных

По средним значениям измерительных величин убыли масс навесок топлива определяется относительная влажность твердого топлива аналитической пробы для каждой навески в отдельности по следующей формуле:

$$W^a = \frac{M_2 - M_4}{M_2 - M_1} \cdot 100 \%$$

Окончательно влажность исследуемого топлива определяется как среднеарифметическое для двух навесок:

$$W_{CP}^a = \frac{W_1^a + W_2^a}{2}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛЬНОСТИ ТОПЛИВА

Цель работы – усвоить классификацию и различные составы топлива, основные его элементы и теплотехнические характеристики, научиться экспериментально определять зольность топлива, усвоить теплотехнические, экономические и экологические недостатки топлива с повышенной зольностью, а также рациональные пути использования золы в сельском хозяйстве.

Общие сведения

Зола – твердый негорючий остаток, образующийся при горении в процессе разложения и окисления минеральных примесей. Эти примеси состоят из силикатов, карбонатов, фосфатов, сульфатов и сульфидов железа, кремния, алюминия, кальция, натрия, калия, марганца и др. элементов. Зола во многом определяет качество топлива и особенность протекания процесса горения. Содержание минеральных примесей в сухой массе топлива иногда достигает 75 %. После сгорания топлива масса золы меньше массы негорючих примесей. Это объясняется превращениями и изменениями, которые претерпевают минеральные примеси в процессе горения топлива. Зола подразделяют на *первичную*, образующуюся при сгорании из минеральных остатков составных элементов – топливообразователей; *вторичную*, образующуюся при сгорании из минеральных примесей, внесенных в топливо в процессе его образования путем выветривания и разложения минеральных пород; *третичную*, образующуюся из минеральных примесей, внесенных в топливо при его добыче, транспортировке и хранении.

Зола твердого топлива содержит глинозем (Al_2O_3), кремнезем (SiO_2), окислы железа (FeO , Fe_2O_3), известь (CaO), магнезию (MgO), окись калия (K_2O), хлориды, щелочи и сульфаты.

Содержание золы в рабочей массе твердого топлива составляет 4–25 %. При сжигании зольного топлива возникают дополнительные трудности, обусловленные плавлением золы или шлакообразованием. Легкоплавкая зола зашлаковывает горящий слой топлива, налипает на поверхности нагрева, резко ухудшая теплопроводность стенок. При высоких температурах шлак вступает в химическое взаимодействие с огнеупорной кладкой и преждевременно разрушает ее.

В зависимости от температуры зола бывает: легкоплавкой ($t_{пл} < 1\ 200\ ^\circ C$), плавкой (1 200 – 1 350 $^\circ C$), тугоплавкой (1 350 – 1 500 $^\circ C$), очень тугоплавкой (1 500 – 1 650 $^\circ C$), огнеупорной ($t_{пл} < 1\ 650\ ^\circ C$). Присутствие в золе щелочей, сульфата натрия, окиси железа снижает температуру плавления.

Минеральные негорючие примеси (зола) обесценивают топливо теплотехнически, экономически и экологически:

- уменьшают содержание горючих элементов, выход летучих веществ и величину теплоты сгорания топлива;
- увеличивают затраты труда и расход ресурсов на добычу, транспортировку, переработку и хранение топлива;
- затрудняют процесс сжигания топлива и снижают интенсивность теплообмена зашлаковыванием горящего слоя и поверхностей нагрева;
- увеличивают недожог и абразивный износ частичками летучей золы поверхностей труб котлоагрегата и дымососа;
- сокращают срок службы огнеупорной обмуровки, в связи с разрушением ее химически агрессивным шлаком, требующим дополнительных технических устройств и мероприятий по его удалению и использованию;
- загрязняют атмосферу и окружающую среду, что требует применения золоулавливающих устройств и своевременного комплексного использования золы в народном хозяйстве.

Золу используют в промышленности строительных материалов частично вместо цемента для получения бетона, в сельском хозяйстве – как удобрение. Из золы некоторых углей получают также полупроводниковые элементы, такие, как германий и галлий.

Методика выполнения работы

При определении зольности топлива оперируют с аналитической пробой. Зольность определяется по ускоренному стандартному методу, суть которого состоит в том, что навеска топлива прокаливается при свободном доступе воздуха (сгорает) в открытом тигле при температуре $850 \pm 25\ ^\circ C$. При этом органическая часть топлива выгорает без пламени, а в тигле остается зола.

При недостатке воздуха в тигле неизбежно произойдет частичное коксование. Образующийся кокс выжечь до конца практически

невозможно. В процессе опыта должно производиться медленное беспламенное сжигание топлива, именно прокаливание. При пламенном сжигании наблюдается неконтролируемый аэродинамический унос минеральных примесей, что занижает истинное значение зольности топлива.

Следует отметить, что при быстром нагреве может также произойти образование кокса, который практически не выжигается.

Лабораторная установка (рис. 3.1) состоит из муфельной электрической печи 1, в которой предусмотрены два отверстия для подвода воздуха и удаления продуктов сгорания. Температура внутри печи измеряется хромель-алюмелевой (ХА) термопарой 4 с потенциометром 5. В системе нагрева предусматривается двухпозиционное автоматическое поддержание соответствующей температуры после выхода установки на режим. Лабораторная установка укомплектована тиглями 2, эксикатором 3 с серной кислотой для охлаждения тигля с пробой после прокаливания, а также лабораторными весами.

Работа выполняется в следующей последовательности.

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, приборами. Вместе с преподавателем проверить работоспособность весов. Взвешивание выполнять с каждой навеской топлива не менее трех раз.

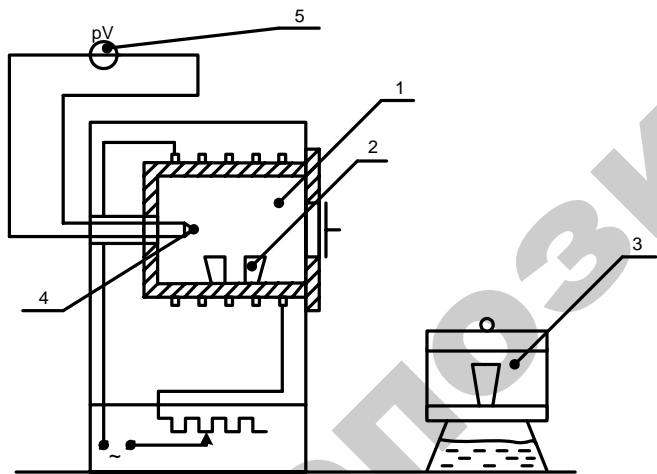


Рис.3.1. Схема муфельной печи

2. Включить муфельную печь в электрическую сеть и разогреть до температуры 850 ± 25 °С.

3. Подготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерения (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Номера тиглей	Результаты измерений			
	Масса тиглей, г			
	Пустого М1	С навеской топлива М2	С золой после прокаливания М3	С золой после контрольного прокаливания М4

4. Взвесить пустые тигли и записать значения масс М1 в таблицу 3.1.

Одновременно исследовать две навески топлива!

5. Тщательно перемешать исследуемое топливо в открытой банке. Записать значение массы М2 в таблицу 3.1.

6. Измерить температуру в печи. При соответствующей температуре открыть переднюю дверцу муфеля и поместить тигли с навесками топлива на край муфеля. В таком положении выдерживать тигли в течение 10 минут. Затем тигли медленно со скоростью 1 см/мин необходимо подвигать внутрь печи до центральной зоны муфеля.

7. По достижении этой зоны тиглями закрыть дверцу муфеля. Прокаливать навески топлива в течение 40 минут, поддерживая температуру равной 850 ± 25 °С.

8. Затем тигли осторожно удалить из печи, разместить на асбестовой подставке, охладить в течение 5 минут на воздухе. Далее поместить их в эксикатор и охладить до комнатной температуры. Взвесить и записать массу М3 в таблицу 3.1.

9. Провести серию контрольных прокаливаний при температуре 850 ± 25 °С в течение 15 минут каждое. При этом разность в массе при двух последующих взвешиваниях не должна превышать 0,001 г. Записать в таблицу 3.1 массу тигля с зональным остатком – М4 после последнего контрольного прокаливания.

Обработка экспериментальных данных

По средним значениям измеренных величин убыли масс навесок топлива после прокаливания или золообразования определяется зольность топлива в аналитической пробе для каждой навески в отдельности по следующей формуле:

$$A^a = \frac{M4 - M1}{M2 - M1} \cdot 100\%.$$

При этом следует учесть, что расхождение между полученными результатами двух навесок топлива не должно превышать 0,2 % для топлива с зольностью до 12 %, 0,3 % – 12–25 %, 0,5 – свыше 25 %.

Окончательно зольность исследуемого топлива определяется как среднее арифметическое для двух навесок:

$$A_{CP}^a = \frac{A_1^a + A_2^a}{2}.$$

Пересчет зольности топлива на сухую массу производится по формуле:

$$A^C = A^a \frac{100}{100 - W^a}.$$

Контрольные вопросы

1. Что такое топливо?
2. Приведите классификацию и состав топлива.
3. Что такое внутренний и внешний балласты топлива?
4. Приведите основные теплотехнические характеристики топлива.
5. Укажите теплотехнические, экономические и экологические недостатки зольного топлива.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ

Цель работы – усвоить классификацию и различные составы топлива, основные его элементы и теплотехнические характеристики, научиться определять выход летучих веществ экспериментально, спекаемость кокса, на основании экспериментальных данных охарактеризовать исследуемое топливо и установить его марку.

Общие сведения

Теплотехнические характеристики топлива

Тепловую ценность топлива характеризуют теплота сгорания и выход летучих веществ, величина которых существенно зависит от зольности и влажности топлива, как известно, обесценивающих топливо. Поэтому все они являются четырьмя важнейшими теплотехническими характеристиками топлива.

Теплота сгорания топлива – теплота, выделяющаяся при полном сгорании 1 кг топлива. Различают низшую и высшую теплоту сгорания топлива. Низшая теплота сгорания топлива меньше высшей на теплоту, затраченную на испарение влаги, образующейся при сгорании водорода топлива, и на испарение влаги самого топлива:

$$Q_H^P = Q_B^P - r \left(\frac{9H^P}{100} + \frac{W^P}{100} \right) = Q_B^P - 226H^P - 25,11W^P, \text{ кДж/кг},$$

где $r = 2511$ кДж/кг – теплота испарения влаги при 20 °С;

$\frac{9H^P}{100}$ – количество влаги, образующейся при сгорании водорода;

$\frac{W^P}{100}$ – количество влаги в топливе.

Теплоту сгорания топлива определяют двумя способами – расчетным или экспериментальным. Теплота сгорания топлива равна сумме теплот, выделяемых при сгорании его отдельных элементов.

$$Q_H^P = 340C^P + 1030H^P - 109(O^P - S_n^P) - 25W^P,$$

где числовые коэффициенты выражают теплоту сгорания отдельных элементов, деленную на 100, а C^P , H^P , O^P , S_n^P – содержание различных элементов в топливе в процентах.

Безусловно, наиболее точно теплоту сгорания определяют экспериментально, сжигая пробу топлива в калориметрической бомбе согласно условиям, установленным ГОСТ 147–74.

Максимальное значение низшей теплоты сгорания твердых топлив составляет $Q_H^P = 28$ МДж/кг (антрациты, каменные угли), минимальное в зависимости от балласта равняется $Q_H^P = 10$ МДж/кг (бурые угли). Для мазутов – $Q_H^P = 28$ МДж/кг. Для природного газа – $Q_H^P = 35$ МДж/м³.

Второй важнейшей теплотехнической характеристикой топлива, которую предстоит экспериментально определять в лабораторной работе № 3, является выход летучих веществ, который, как правило, приводится в процентах горючей массы топлива. Чем больше выход летучих веществ топлива, тем ниже температура воспламенения, легче его зажигание и больше объем пламени. При нагревании твердого топлива без доступа воздуха (сухой перегонки) при достаточно высокой температуре оно разлагается на газообразные продукты (летучие вещества), влагу и твердый остаток (кокс). Кокс состоит из углерода и золы. При нагревании топлива сначала выделяется внешняя влага, затем отгоняются конденсирующие пары масел и жирных кислот, являющиеся продуктами прямой отгонки. С повышением температуры наступает разложение топлива с выделением углеводородных газов и паров, а масса топлива, спекаясь, вновь затвердевает, образуя кокс.

Выход летучих веществ неравномерен во времени и зависит от температуры. В процессе сухой перегонки спекающихся углей при 350–450 °С сначала происходит размягчение угля, объясняемое тем, что содержащиеся в топливе битумы переходят в жидкое состояние. И только после этого с повышением температуры наступает разложение топлива с выделением углеводородных газов и паров, а масса топлива, спекаясь, вновь затвердевает, образуя кокс. С физико-химической точки зрения при сухой перегонке ослабляются связи между отдельными атомами и их звеньями. Наиболее

слабые связи сложных органических молекул распадаются на простые звенья. Получаются новые продукты, выдерживающие более высокую температуру. Последними распадаются простые углеводороды – метан CH_4 , этилен C_2H_4 и др. Летучие вещества состоят из горючих газов – CO , H_2 , H_2S и негорючих – CO_2 , O_2 , N_2 и др.

Выход летучих веществ в основном зависит от геологического возраста топлива, уменьшаясь с его увеличением, что объясняется разложением топлива в недрах земли. Например, для антрацитов выход летучих веществ составляет всего 29 %, для древесины много больше – 85 %. Поэтому в основу классификации твердого топлива положены выход летучих веществ и вид кокса. Именно эти характеристики определяют процессы искусственной переработки и сгорания топлива в топках. В зависимости от исходного топлива кокс бывает трех видов: спекшийся, сплавленный и порошкообразный. Например, бурыми называют угли с выходом летучих веществ более 40 %, каменными – 10–40 %. В зависимости от вида кокса (точнее, от степени спекаемости) маркируют угли – длиннопламенный (Д), газовый (Г), слабоспекающийся (СС) и т. п.

Выход летучих веществ, отнесенный к аналитической пробе, сухой или рабочей массам отличается в больших пределах в зависимости от степени загрязнения топлива примесями, т. е. зависит от внешнего балласта – золы и влаги. Поэтому топливо одного и того же месторождения можно ошибочно отнести к различным маркам. Во избежание этого установлено для маркировки топлива выход летучих веществ приводить к горючей массе:

$$V^G = V^a \frac{100}{100 - A^a - W^a}.$$

Методика выполнения работы

Экспериментально выход летучих веществ топлива определяется на основании ГОСТ стандартным методом. При этом навески топлива нагреваются в муфельной печи без доступа воздуха при температуре 850 ± 10 °С в течение 7 минут.

Для сопоставления результатов исследования необходимо строго в процессе эксперимента соблюдать указанные температуру и продолжительность прокаливании.

Выход летучих веществ измеряется как отношение убыли массы навески топлива после прокаливания при указанных условиях к первоначальной массе навески за вычетом влажности топлива.

Влажность топлива определяется заранее экспериментально в лабораторной работе № 1, ее результаты используются в данной работе.

Лабораторная установка (рис. 2.1) состоит из муфельной электрической печи 1, в передней дверце которой предусмотрено отверстие для лучшего удаления летучих веществ. Температура внутри печи измеряется хромель-алюмелевой (ХА) термопарой 4 с потенциометром 5. В системе нагрева предусматривается двухпозиционное автоматическое поддержание соответствующей температуры после выхода установки на режим. Лабораторная установка укомплектована тиглями 2 с крышками, эксикатором 3 с серной кислотой для охлаждения тигля с пробой после прокаливания, а также лабораторными весами ВЛКТ-500г-М 4 класса.

Работа выполняется в следующей последовательности.

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, используемыми приборами и инструкцией по взвешиванию на весах. Вместе с преподавателем проверить работоспособность весов. Взвешивание выполнять с каждой навеской топлива не менее трех раз.

2. Включить муфельную печь в электрическую сеть и разогреть до температуры 850 °С.

3. Подготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерения (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Результаты измерений

Номера тиглей	Масса тиглей, г		
	Пустого с крышкой М1	С навеской топлива М2	После прокаливания М3

4. Взвесить пустые тигли с крышкой и записать значения масс М1 в таблицу 4.1.

Одновременно исследовать две навески топлива!

5. Тщательно перемешать исследуемое топливо в открытой банке, насыпать в тигель и взвесить вместе с крышкой. Записать значение массы М2 в таблицу 4.1.

6. Тигель с навеской топлива плотно закрыть крышкой и быстро поместить в муфельную печь. Зафиксировать время. Дверцу печи закрыть и выдерживать тигель с навеской при заданной температуре в течение 7 минут.

7. После прокаливания тигель осторожно удалить из печи, разместить на асбестовой подставке, зафиксировать время и охлаждать на воздухе в течение 5 минут. Затем поместить его в эксикатор и охлаждать до комнатной температуры.

8. Взвесить тигли с навеской и записать значения масс М3 в таблицу 4.1.

Обработка экспериментальных данных

Величина выхода летучих веществ для аналитической массы топлива определяется по относительной убыли массы навески топлива в процентах с помощью следующей формулы:

$$V^a = \bar{M} \cdot 100 - W^a,$$

где $\bar{M} = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1}$ – относительная убыль массы навески топлива;

W^a – относительная влажность аналитической массы топлива.

Принимается по результатам лабораторной работы № 1.

Чтобы по величине выхода летучих веществ и виду коксового остатка дать точную характеристику исследуемого топлива (установить марку), необходимо пересчитать полученный выше результат на горючую массу по формуле:

$$V^r = V^a \frac{100}{100 - A^a - W^a}.$$

При этом зольность топлива принимается по результатам лабораторной работы № 2.

Контрольные вопросы

1. Что такое топливо?
2. Приведите классификацию и состав топлива.
3. Охарактеризуйте горючие элементы топлива.
4. Какие элементы составляют балласт топлива и почему?
5. Перечислите основные теплотехнические характеристики топлива.
6. Какой элемент топлива играет основную роль в образовании летучих веществ?
7. Какие особенности сжигания топлива с повышенным выходом летучих веществ?

Лабораторная работа № 5

ПРОВЕРКА КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРОСТЕЙШИМИ МЕТОДАМИ

Цель работы – изучение простейших методов определения вида и качества топлива и масел.

Содержание работы: дать оценку исследуемым образцам топлива и картерного масла по внешним признакам; определить содержание механических примесей и воды.

Исследование топлива

Цвет топлива зависит от наличия в нем растворенных смол, присутствия этиловой жидкости или случайных примесей, являющихся следствием смешения топлива с другими нефтепродуктами.

Бензины прямой гонки бесцветны; керосин прямой гонки окрашен в светло–желтый цвет. Дизельное топливо обычно желтого или светло–коричневого цвета. Бензины и керосины в зависимости от количества растворенных в них смол имеют окраску от соломенно-желтой до темно-желтой и даже коричневой. Чем темнее цвет топлива, тем больше в нем смол и тем хуже его качество. При использовании темных топлив с высоким содержанием смол наблюдается большое нагарообразование на деталях двигателя.

Топлива, содержащие этиловую жидкость (для предупреждения об их ядовитости), окрашивают в розово-красный или сине-зеленый цвета. Интенсивность окраски зависит от количества этиловой жидкости.

Прозрачность. Все нефтепродукты с однородной фазовой структурой прозрачны. Нарушение фазовой однородности вызывает помутнение образца. Если при комнатной температуре образец мутный, это указывает на наличие в нем эмульсионной воды.

Если при комнатной температуре образец прозрачный, а при понижении температуры до 0–5 °С мутнеет, то это происходит в результате выпадения из топлива кристаллов парафина. Такое топливо имеет высокую температуру застывания и может применяться только в теплое время года. Особенно нежелательно выпадение кристаллов парафина в дизельном топливе, так как они забивают фильтры очистки топлива, нарушают нормальную подачу топлива

и даже прекращают ее. Прозрачность топлива проверяется в стеклянном цилиндре емкостью 50–100 мл.

Запах. Прямогонные бензины и керосины имеют свой специфический запах. Особенно резкий запах у бензина. Дизельное топливо на вид более густое, слегка маслянистое и почти без запаха. Топлива, содержащие продукты термического крекинга, имеют характерный резкий и неприятный запах. Резкий запах имеют также топлива, содержащие большое количество ароматических углеводородов (бензола). Запах бензола легко запоминается и легко определяется даже в различных смесях топлива.

Испаряемость. О сорте топлива легко судить по его испаряемости. Стеклопалочкой на листик белой бумаги наносят каплю топлива и дают ему испариться. Для ускорения испарения можно помахать бумагой или слегка подогреть ее с обратной стороны. Авиационные бензины испаряются быстро и полностью (в течение 1–2 мин). Автомобильные бензины испаряются медленнее, и на бумаге остается желтоватое пятно, которое испаряется только после нагревания бумаги над электроплиткой. Керосин и дизельное топливо полностью не испаряются. На бумаге длительное время остается желтое жирное пятно, которое практически является исчезающим.

Определение фактических смол. Предварительно отфильтрованное испытуемое топливо в количестве 1 мл наносят пипеткой в центр сферического стекла диаметром 60 мм. Тяжелые топлива (дизельное, керосин) предварительно можно разбавить равным объемом бензина, не содержащего смол. Топливо на стекле поджигают спичкой. Легкие топлива (бензин, бензол) загораются сразу, керосин – после небольшого подогревания стекла на спиртовке, а дизельное топливо – после значительного подогревания. По окончании горения стеклу дают остыть и осматривают остаток на нем.

Бензины, не содержащие смол, оставляют на стекле небольшой след в виде слабозаметного беловатого пятна. Смолистые топлива оставляют ряд концентрических колец желтого или коричневого цвета. Чем больше в топливе смол, тем больше диаметр пятна.

Если в топливе много бензола и других ароматических углеводородов, то после сжигания остается небольшое коричневое кольцо с черным углистым остатком внутри. Топлива, загрязненные маслами, оставляют отдельные несгоревшие капли, расположенные

с внешней стороны кольца. Диаметр пятна измеряют в трех направлениях и берут среднее значение его в миллиметрах. Зная диаметр пятна, по таблице 5.1 находят содержание смол (приблизленно).

Таблица 5.1

Содержание смол в топливе

Диаметр пятна, мм	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Количество смол в 100 мл топлива, мг	4	11	20	32	43	56	70	85	102	120

Определение коррозионности нефтепродуктов. Коррозионность топлива обуславливается содержанием в нем сернистых соединений, органических кислот и минеральных кислот или щелочей. Наиболее сильную коррозию вызывают активные сернистые соединения, а также минеральные кислоты и щелочи. Эти вещества недопустимы ни в одном виде горючего. Органические кислоты и неактивные сернистые соединения содержатся в топливе, но чем меньше их в нем, тем лучше его качество.

Коррозионные свойства топлив простейшим методом проверяют следующим путем. Отполированную пластинку из красной меди помещают в испытуемое топливо и в течение 3 часов выдерживают в нем при температуре 50 °С (нагревание ведут на водяной бане). Если на пластинке появится пленка или налеты черного, коричневого или серого цветов, это указывает на присутствие в топливе активных сернистых соединений. Такое топливо к эксплуатации непригодно. Появление на пластинке зеленых пятен или следов разрушения указывает на повышенное содержание кислот.

Исследование картерного масла

Цвет масла зависит от количества содержащихся в нем смол. Масла, не содержащие смол, бесцветны. Оттенки картерных масел меняются от темно-желтых до красных.

В отраженном свете авиационные и хорошие дизельные масла флюоресцируют зеленовато-голубым цветом, а автолы – синеватым, что указывает на большее содержание в них смолистых веществ.

Цвет образца определяется осмотром его в проходящем свете в пробирке из бесцветного стекла. Пробирку помещают между глазом наблюдателя и источником света (солнечный свет, электрическая лампа). Если масло в толстом слое непрозрачно, то цвет его определяют в тонком слое, например осмотром масла, стекающего по стенкам стеклянной посуды. Цвет испытуемых масел хорошо сравнивать с эталонными образцами. Если масло в тонком слое мутное, это указывает на наличие в нем эмульсионной воды. Масло с водой может давать очень стойкие эмульсии. Такие масла перед применением необходимо обезводить.

Определение воды и механических примесей. Для определения наличия воды пробу масла тщательно перемешивают (встряхивая бутылку) и в количестве 2–3 мл наливают в пробирку. Пробирку осторожно нагревают. При наличии воды происходит вспенивание образца, слышно характерное потрескивание, на верхней, холодной части пробирки скапливаются мельчайшие капельки сконденсировавшейся воды. Если потрескивания нет, но верхняя часть пробирки слегка затуманилась, то в масле содержатся следы воды.

Для определения механических примесей предварительно подогретую до 40–50 °С пробу масла тщательно перемешивают и чистой стеклянной палочкой наносят несколько капель масла на фильтровальную бумагу и на стекло. Если механические примеси есть, то при рассмотрении капель масла на просвет отчетливо видны отдельные вкрапления или темные подтеки.

Масла, содержащие механические примеси и воду, перед использованием необходимо отстоять и профильтровать.

Определение наличия присадки в картерных маслах. В дизельных двигателях используются масла, содержащие присадки. Ориентировочно наличие присадки определяют следующим путем. 15–20 мл чистого масла (не содержащего механических примесей) осторожно сжигают в фарфоровом тигле. Угlistый остаток прокалывают при температуре 550–600 °С. Если масло не содержит присадку, то золы практически не остается, на дне тигля должен быть очень небольшой желтоватый осадок. Если в масле содержится присадка, то получается значительно большее количество остатка. Осадок бывает светло-серого или белого цветов.

Экспериментальные данные

По представленным преподавателем образцам студенты должны определить виды и качество топлива и масел.

1. Определение вида жидкого топлива по цветности, запаху и прозрачности.
2. Определение наличия смол.
3. Определение наличия воды в топливе.
4. Определение наличия воды в картерном масле.
5. Определение наличия присадки в картерном масле.

Результаты исследования

На основании выполненных анализов установить марки топлива и масла. Дать заключение об их качестве и возможности использования в двигателях внутреннего сгорания.

Контрольные вопросы

1. Чем характеризуется цветность бензина?
2. Как по цветности определить вид топлива?
3. Как определяется наличие смол и присадок в топливе?
4. Как определяется качество картерного масла?
5. Как определяется присутствие воды и механических примесей в картерном масле?

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по теплоснабжению сельского хозяйства / Л. С. Герасимович [и др.]. – Минск : Ураджай, 1993. – 368 с.
2. *Эстеркин, Р. И.* Котельные установки. Курсовое и дипломное проектирование : учебное пособие для техникумов /Р. И. Эстеркин. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – с.
3. Теплоснабжение. Котельное оборудование : справ. пособие / Л. С. Овчинников. – Минск : Дизайн ПРО, 2007. – 432 с.
4. *Делягин, Г. Н.* Теплогенерирующие установки / Г. Н.Делягин, В. И. Лебедев, Б. А. Пермяков.– М. : Стройиздат, 1986. – 560 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Коэффициенты пересчета для древесного топлива

Единица	Тип древесины	Влажность	м ³ навалный	Тонна	Тонна "atro"	Эквивалент, МВт-ч
1 м ³ навалный (объем щепы)	Ель	15 %	1	0,2	0,17	0,876
		30 %	1	0,25	0,17	0,847
		45 %	1	0,31	0,17	0,819
	Береза	15 %	1	0,32	0,27	1,298
		30 %	1	0,39	0,27	1,252
		45 %	1	0,49	0,27	1,18
1 тонна (вес зеленой щепы)	Ель	15 %	5	1	0,85	4,38
		30 %	4	1	0,68	3,338
		45 %	3,2	1	0,55	2,621
	Береза	15 %	3,1	1	0,85	4,024
		30 %	2,6	1	0,69	3,255
		45 %	2,1	1	0,55	2,478
1 тонна "atro" (вес сухой щепы)	Ель	15 %	5,88	1,18	1	5,151
		30 %	5,88	1,47	1	4,98
		45 %	5,88	1,82	1	4,816
	Береза	15 %	3,7	1,18	1	4,803
		30 %	3,7	1,44	1	4,632
		45 %	3,7	1,81	1	4,366
1 МВт-ч (эквивалент)	Ель	15 %	1,14	0,228	0,194	1
		30 %	1,18	0,295	0,2	1
		45 %	1,22	0,382	0,208	1
	Береза	15 %	0,77	0,248	0,208	1
		30 %	0,8	0,307	0,215	1
		45 %	0,85	0,403	0,229	1

2. Сравнение значений теплоты сгорания топлива

Топливо (энергоноситель)	Теплота сгорания (среднее значение)	Эквивалент, кВт-ч
1 кг печного топлива (сверхлегкого)	42 МДж/кг (36 ДЖМ/л)	11,67 кВтч /кг (10 кВтч /л)
1 кг печного топлива (легкого)	41 МДж/кг	11,40 кВтч /кг
1 кг каменного угля	29 МДж/кг	8,06 кВтч /кг
1 кг кокса	29 МДж/кг	8,06 кВтч /кг
1 кг бурого угля	15 МДж/кг	4,17 кВтч /кг
1 м ³ природного газа	37 МДж/м ³	10,28 кВтч /м ³
1 кВтч электроэнергии	3,6 МДж	1,0 кВтч
1 кг древесины (влажность: 20 %), среднее значение	14,4 МДж/кг	4,0 кВтч /кг

3. Зависимость плотности древесины от метода штабелирования и влажности

	Береза		
	Твердый кубический метр	Штабелный кубический метр	Навалный кубический метр
Влажность	(кг/м ³)	(кг/м ³)	(кг/м ³)
0%	558	391	229
20%	656	460	269
40%	797	559	327
100%	1,116	781	458
	Ель		
	Твердый кубический метр	Штабелный кубический метр	Навалный кубический метр
Влажность	(кг/м ³)	(кг/м ³)	(кг/м ³)
0%	379	265	155
20%	446	312	182
40%	541	379	221
100%	758	531	311

4. Характеристики топлива

Стружка, ель					
Водосодержание	0%	45%	50%	55%	60%
Увеличение объема		0,05	0,1	0,15	0,15
Вес (навалный), кг/м ³	120	212,18	228	248,67	282
€/ навалный, м ³	5,81	5,81	5,81	5,81	5,81
Низшая теплота сгорания кВт-ч / кг	5,22	2,57	2,27	1,98	1,68
Промышленная щепа (щепа от переработки целых деревьев)					
Водосодержание	0%	45%	50%	55%	60%
Увеличение объема		0.05	0.1	0.15	0.15
Вес (навалный), кг/м ³	180	318.27	342	373	423
€/ навалный, м ³	8.72	8.72	8.72	8.72	8.72
Низшая теплота сгорания кВт-ч / кг	5.22	2.57	2.27	1.98	1.68
Материал, полученный при обработке (опилки), ель					
Водосодержание	0%	45%	50%	55%	60%
Увеличение объема		0,05	0,1	0,15	0,15
Вес (навалный), кг/м ³	100	176,82	190	207,22	235
€/ навалный, м ³	5,09	5,09	5,09	5,09	5,09
Низшая теплота сгорания кВт-ч / кг	5,22	2,57	2,27	1,98	1,68

5. Коэффициенты пересчета в условное топливо то угольному эквиваленту

Уголь*	тонна	0,814
Торф топливный	тонна	0,340
Брикеты топливные (при условной влажности 16%)	тонна	0,600
Дрова для отопления	плотн.м ³	0,266
Нефть, включая газовый конденсат	тонна	1,430
Газ горючий природный (естественный)	тыс.м ³	1,15
Газ попутный при добыче	тыс.м ³	1,65
Кокс металлургический	тонна	0,990
Мазут топочный	тонна	1,370
Мазут флотский	тонна	1,430
Топливо печное бытовое	тонна	1,450
Керосин тракторный	тонна	1,470
Керосин осветительный	тонна	1,470
Газ нефтепереработки сухой	тонна	1,500
Газ сжиженный	тонна	1,570
Топливо дизельное	тонна	1,450
Топливо моторное	тонна	1,430
Бензин автомобильный	тонна	1,490
Бензин авиационный	тонна	1,490
Топливо для реактивных двигателей	тонна	1,470

6. Низшая теплота сгорания дров на рабочую массу $Q_{н}^P$, кВт·ч/кг (при средней теплоте сгорания на горючую часть 19,2 МДж/кг)

Влажность W^r , %	Теплота сгорания $Q_{н}^P$, кВт·ч/кг в соответствии с зольностью на рабочую массу				
	1%	2%	3%	4%	5%
25	3,79	3,75	3,71	3,67	3,63
26	3,73	3,69	3,65	3,61	3,57
27	3,67	3,63	3,59	3,55	3,52
28	3,61	3,57	3,54	3,50	3,46
29	3,55	3,51	3,48	3,44	3,40
30	3,49	3,46	3,42	3,38	3,34
31	3,43	3,40	3,36	3,32	3,29
32	3,37	3,34	3,30	3,26	3,23
33	3,31	3,28	3,24	3,21	3,17
34	3,25	3,22	3,18	3,15	3,11
35	3,19	3,16	3,13	3,09	3,06
36	3,14	3,10	3,07	3,03	3,00
37	3,08	3,04	3,01	2,97	2,94
38	3,02	2,98	2,95	2,92	2,88
39	2,96	2,92	2,89	2,86	2,83
40	2,90	2,86	2,83	2,80	2,77
41	2,84	2,81	2,77	2,74	2,71
42	2,78	2,75	2,72	2,68	2,65
43	2,72	2,69	2,66	2,63	2,60
44	2,66	2,63	2,60	2,57	2,54
45	2,60	2,57	2,54	2,51	2,48
46	2,54	2,51	2,48	2,45	2,42
47	2,48	2,45	2,42	2,40	2,37
48	2,42	2,39	2,36	2,34	2,31
49	2,36	2,33	2,31	2,28	2,25
50	2,30	2,27	2,25	2,22	2,19

7. Технические условия и классы качества твердых биотоплив и торфа, применяемые в странах Балтийского региона

Сегодня возрастает интерес к использованию остатков рубки леса и отходов деревообработки для производства топлива – как для местного потребления, так и для экспорта. В связи с этим специалистам-энергетикам нашей республики могут быть полезны сведения по техническим условиям и классам качества твердых биотоплив и торфа, а также по низшей теплоте сгорания дров на рабочую массу, которые применяются в странах региона Балтийского моря.

Древесная щепа

Происхождение топлива: древесная биомасса.

Форма продажи: древесная щепа.

Размер, мм².

Нормативные		Основная фракция > 80 % по весу	Тонкая фракция < 5 %	Грубая фракция, макс. длина частиц
	P16		3,15 мм ≤ 16 мм	< 1 мм
P45		3,15 мм ≤ 45 мм	< 1 мм	max 1 % ^a > 63 мм
P63		3,15 мм ≤ 63 мм	< 1 мм	max 1 % ^a > 100 мм
P100		3,15 мм ≤ 100 мм	< 1 мм	max 1 % ^a > 200 мм
Влажность (% на рабочую массу)				
M20		≥ 20 %	Сухое	
M30		≥ 30 %	Пригодное для складирования	
M40		≥ 40 %	Ограниченно пригодное для складирования	
M55		≥ 55 %		
M65		≥ 65 %		
Зольность (% на сухую часть)				
A0.7		≤ 0,7 %		
A1.5		≤ 1,5 %		
A3.0		≤ 3,0 %		
A6.0		≤ 6,0 %		
A10.0		≤ 10,0 %		

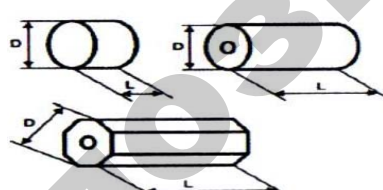
	Основная фракция > 80 % по весу	Тонкая фракция < 5 %	Грубая фракция, макс. длина частиц
Азот, N (% на сухую часть)			
N0.5	≤ 0,5 %	Азот нормируется только для химически обработанной биомассы	
N1.0	≤ 1,0 %		
N3.0	≤ 3,0 %		
N3.0+	≤ 3,0 % (должна быть привлечена реальная величина)		
Информативные	Низшая теплота сгорания на рабочую массу Q_H^P , МДж/кг или энергоёмкость E^P (кВт ч/м ³ насыпной)		Рекомендуется приводить при розничной торговле
	Насыпная плотность рабочей массы (кг/м ³)		Рекомендуется приводить при продаже в объёмных единицах в категориях (BD200, BD300, BD450)
	Хлор, Cl (массовый % на сухую часть)		Рекомендуется приводить по категориям C10.03, C10.07, C10.10 и C10.10+ (если Cl > 0,1 %, приводить реальное содержание)
* Численные значения размеров относятся к размерам частиц, проходящим через упомянутое круглое отверстие сита размером (3,15 мм, 16 мм, 45 мм, 63 мм, 100 мм). Размеры реальных частиц могут отличаться от этих величин, особенно длина частиц.			

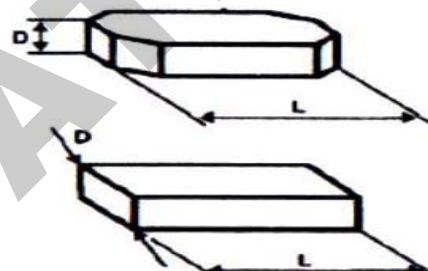
Брикеты

Происхождение топлива: древесная биомасса, травяная биомасса, биотопливо с добавками, торф.

Форма продажи: брикет.

Диаметр или эквивалентный размер, мм.

Нормативные	Диаметр (D)		
	D40	25 ≤ D ≤ 40	
	D50	≤ 50	
	D60	≤ 60	
	D80	≤ 80	
	D100	≤ 100	
	D125	≤ 125	
	D125+	> 125 (приводить реальное значение)	

Длина (L)		
L50	≤ 50	
L100	≤ 100	
L200	≤ 200	
L300	≤ 300	
L400	≤ 400	
L400+	> 400 (приводить реальное значение)	
Влажность (% на рабочую массу)		
M10	≤ 10 %	
M15	≤ 15 %	
M20	≤ 20 %	
Зольность (% на сухую часть)		
A0.7	≤ 0,7 %	
A1.5	≤ 1,5 %	
A3.0	≤ 3,0 %	
A6.0	≤ 6,0 %	
A10.0	≤ 10,0 %	
Сера, S, (массовый % на сухую часть)		
S0.05	≤ 0,05 %	Сера нормируется только для химически обработанной биомассы или используются содержащие серу добавки
S0.08	≤ 0,08 %	
S0.10	≤ 0,10 %	
S0.20	≤ 0,20 %	
S0.20+	> 0,20 % (приводить реальное значение)	
Плотность брикета, кг/дм³		
DE0.8	0,80-0,99	
DE1.0	1,00-1,09	
DE1.1	1,10-0,99	
DE1.2	≥ 1,20	
Включения (массовый % прессуемой массы)		
Должны быть приведены тип и содержание добавок при прессовании, замедлителей шлакования и любых других включений		
Азот, N (% на сухую часть)		
N0.3	≤ 0,3 %	Азот нормируется только для химически обработанной биомассы
N0.5	≤ 0,5 %	

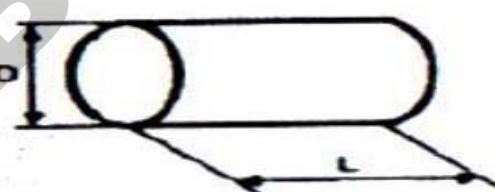
	N1.0	$\leq 1,0 \%$	
	N3.0	$\leq 3,0 \%$	
	N3.0+	$\leq 3,0 \%$ (должна быть привлечена реальная величина)	
Информативные	Низшая теплота сгорания на рабочую массу Q_H^P , МДж/кг или энергоемкость E^P (кВт ч/м ³ насыпной)		Рекомендуется приводить при розничной торговле
	Насыпная плотность рабочей массы (кг/м ³)		Рекомендуется приводить при продаже в объемных единицах в категориях (BD200, BD300, BD450)
	Хлор, Cl (массовый % на сухую часть)		Рекомендуется приводить по категориям C10.03, C10.07, C10.10 и C10.10+ (если Cl > 0,1 %, приводить реальное содержание)

Пеллеты

Происхождение топлива: древесная биомасса, травяная биомасса, биотопливо с добавками, торф.

Форма продажи: пеллеты.

Размеры, мм.

Нормативные	Диаметр (D) и длина (L). Не более 20 % пеллет могут быть длиной $7.5 \times$ диаметр	
		
	D06	$\leq 6 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$ и $L \leq 5 \times D$
	D08	$\leq 8 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$ и $L \leq 4 \times D$
	D10	$\leq 10 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$ и $L \leq 4 \times D$
	D12	$\leq 12 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$ и $L \leq 4 \times D$
	D25	$\leq 25 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$ и $L \leq \times D$
	Влажность (% на рабочую массу)	
	M10	$\leq 10 \%$
	M15	$\leq 15 \%$
M20	$\leq 20 \%$	
Нормативные	Зольность (% на сухую часть)	
	A0.7	$\leq 0,7 \%$
	A1.5	$\leq 1,5 \%$
	A3.0	$\leq 3,0 \%$
	A6.0	$\leq 6,0 \%$
	A6.0+	$> 6,0 \%$ (приводить реальное значение)

Сера, S, (массовый % на сухую часть)		
S0.05	$\leq 0,05 \%$	Сера нормируется только для химически обработанной биомассы или используются содержащие серу добавки
S0.08	$\leq 0,08\%$	
S0.10	$\leq 0,10 \%$	
S0.20+	$> 0,20 \%$ (приводить реальное значение)	
Механическая устойчивость (DU) (массовый % после испытания)		
DU97.5	$\geq 97,5 \%$	
DU95.0	$\geq 95,0 \%$	
DU90.0	$\geq 90,0 \%$	
Объем тонкой фракции (массовый %, < 3,15 мм) после изготовления		
F1.0	$\leq 1,0 \%$	На последнем звене цепочки производства
F2.0	$\leq 2,0 \%$	
F2.0+	$> 2,0 \%$ (приводить реальное значение)	
Включения (массовый % прессуемой массы)		
Должны быть приведены тип и содержание добавок при прессовании, замедлителей шлакования и любых других включений		
Азот, N (% на сухую часть)		
N0.3	$\leq 0,3 \%$	Азот нормируется только для химически обработанной биомассы
N0.5	$\leq 0,5 \%$	
N1.0	$\leq 1,0 \%$	
N3.0	$\leq 3,0 \%$	
N3.0+	$\leq 3,0 \%$ (должна быть привлечена реальная величина)	
Информативные	Низшая теплота сгорания на рабочую массу Q_H^P , МДж/кг или энергоемкость E^P (кВт ч/м ³ насыпной)	Рекомендуется приводить при розничной торговле
	Насыпная плотность рабочей массы (кг/м ³)	Рекомендуется приводить при продаже в объемных единицах в категориях (BD200, BD300, BD450)
	Хлор, Cl (массовый % на сухую часть)	Рекомендуется приводить по категориям C10.03, C10.07, C10.10 и C10.10+ (если Cl > 0,1 %, приводить реальное содержание)

Древесная кора

Происхождение топлива: древесная биомасса.
Форма продажи: кора.

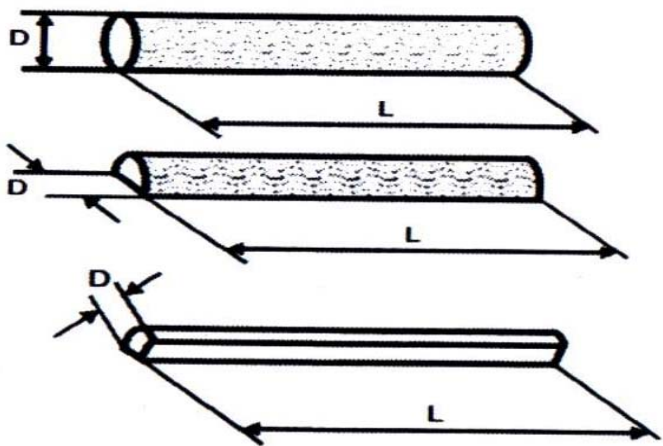
Нормативные	Влажность (% на рабочую массу)	
	M40	$\leq 40 \%$
	M50	$\leq 50 \%$
	M60	$\leq 60 \%$
	M70	$\leq 75 \%$
	Зольность (% на сухую часть)	
	A0.7	$\leq 0,7 \%$
	A1.5	$\leq 1,5 \%$
	A3.0	$\leq 3,0 \%$
	A6.0	$\leq 6,0 \%$
	A12,0	$\leq 12,0 \%$
	Азот, N (% на сухую часть)	
	N0.5	$\leq 0,5 \%$
N1.0	$\leq 1,0 \%$	
N3.0	$\leq 3,0 \%$	
N3.0+	$\leq 3,0 \%$ (должна быть привлечена реальная величина)	
Измельчение		
Приводить данные по измельчению (измельченная или неизмельченная)		
Информативные	Низшая теплота сгорания на рабочую массу Q_H^P , МДж/кг или энергоемкость E^P (кВт ч/м ³ насыпной)	Рекомендуется приводить при розничной торговле
	Насыпная плотность рабочей массы (кг/м ³)	Рекомендуется приводить при продаже в объемных единицах в категориях (BD200, BD300, BD450)
	Хлор, Cl (массовый % на сухую часть)	Рекомендуется приводить по категориям C10.03, C10.07, C10.10 и C10.10+ (если Cl > 0,1 %, приводить реальное содержание)

Дрова (древесные поленья)

Происхождение топлива: древесная биомасса.

Форма продажи: поленья.

Размеры, мм.

Нормативные		
	Длина (L) и диаметр (D) (наибольший диаметр отдельных чурбаков)	
	P200-	$L < 200$ мм и $D < 20$ (дрова для розжига)
	P200	$L = 200 \pm 20$ и $40 \text{ мм} \leq D \leq 150$ мм
	P250	$L = 250 \pm 20$ и $40 \text{ мм} \leq D \leq 150$ мм
	P330	$L = 330 \pm 20$ и $40 \text{ мм} \leq D \leq 160$ мм
	P500	$L = 500 \pm 40$ и $60 \text{ мм} \leq D \leq 250$ мм
	P1000	$L = 1000 \pm 500$ и $60 \text{ мм} \leq D \leq 350$ мм
	P1000+	$L > 1000$ мм (должны быть указаны реальная длина и диаметр)
	Влажность (% на рабочую массу)	
M20	≤ 20 %	Пригодные для печки поленья
M30	≤ 30 %	Высушенные на складе
M40	≤ 40 %	Высушенные в лесу
M65	≤ 65 %	Свежие после рубки на лесосеке
Дрова		
Указать, какое дерево, хвойное или лиственное		

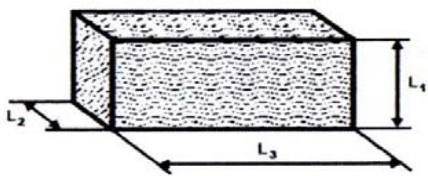
Информативные	Энергоемкость E^p (кВт/м ³ , кубометр насыпной или в штабе)	Указывать при розничной продаже
	Объем, м ³ , плотный, в штабеле или насыпной, как получен	Указать, какой объем использован при розничной продаже
Информативные	Пропорции объема котловых дров	Нерасколотые (в основном кругляк) Колотые: более 85 % объема - колотые Смесь: смесь колотых дров и кругляка
	Поверхность раскола	Указать, является ли поверхность раскола ровной, гладкой*, а торцы поленьев неровными
Информативные	Плесень и гниль	Если значительная часть дров поражена плесенью и гнилью (более 10 % по весу), это должно быть указано
		В сомнительных случаях в качестве индикатора можно использовать плотность частиц и низшую теплоту сгорания
Достичь ровности и гладкости можно, используя цепную пилу		

Прессованная солома

Происхождение топлива: травяная биомасса.

Форма продажи: тюки.

Размеры (мм), высота (L_1), ширина (L_2) и длина (L_3).

Нормативные				
		Высота L_1	Высота L_2	Высота L_3
	P1	1300	1200	2200
	P2	1300	1200	2400
	P3	600-900	1200	2400
P4	1300	1200	1100-2750	

Плотность тюка (кг/м³)		
BD130	≤ 130	
BD150	≤ 150	
BD165	≤ 165	
BD165+	≤ 165	
Влажность (% на рабочую массу)		
M16	≤ 16 %	Нет частей с влажностью 23 %
M16+	≤ 16 %	Допустимы части с влажностью 23 %
M23	≤ 23 %	Нет частей с влажностью 30 %
M23+	≤ 23 %	Одна или более частей с влажностью выше 30 %
M30	≤ 30 %	Нет частей с влажностью выше 30 %
M30+	≤ 30 %	Одна или более частей с влажностью 35 %
Зольность (массовый % на сухую часть)		
A05	≤ 0,7 %	
A10	≤ 1,5 %	
A10+	≤ 3,0 %	
Разновидность биомассы		
Должно быть указано		
Информативные	Низшая теплота сгорания на рабочую массу Q_H^P , МДж/кг или энергоемкость E^P (кВт ч/м ³ насыпной)	Рекомендуется приводить
	Размер и структура частиц	Рекомендуется приводить метод производства, влияющий на размер частиц соломы. Например, производился ли обмолот вращением или вибрацией, была ли солома измельчена

Древесные опилки

Происхождение топлива: древесная биомасса.
Форма продажи: опилки.

Нормативные	Влажность (% на рабочую массу)		
	M20	≤ 20 %	Сухие
	M30	≤ 30 %	Пригодные для складирования
	M35	≤ 35 %	Ограничения на складирование
	M55	≤ 55 %	
	M65	≤ 65 %	
	Зольность (массовый % на сухую часть)		
	A0.7	≤ 0,7 %	
	A1.5	≤ 1,5 %	
	A3.0	≤ 3,0 %	
	A6.0	≤ 6,0 %	
	Азот, N (% на сухую часть)		
	N0.5	≤ 0,5 %	Азот нормируется только для химически обработанной биомассы
	N1.0	≤ 1,0 %	
N3.0	≤ 3,0 %		
N3.0+	≤ 3,0 % (указать реальные величины)		
Информативные	Низшая теплота сгорания на рабочую массу Q_H^P , МДж/кг или энергоемкость E^P (кВт ч/м ³ насыпной)	Рекомендуется указать	
	Насыпная плотность рабочей массы (кг/м ³)	Рекомендуется приводить при продаже в объемных единицах в категориях (BD200, BD300, BD350)	
	Хлор, Cl (массовый % на сухую часть)	Рекомендуется приводить по категориям C10.03, C10.07, C10.10 и C10.10+ (если Cl > 0,1 %, приводить реальное содержание)	
NB! Размер частиц опилок предполагается однородным. Распределение частиц может быть приведено по требованию.			

СОДЕРЖАНИЕ

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	3
Лабораторная работа № 1.	
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА.	4
Лабораторная работа № 2.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ТОПЛИВА.	11
Лабораторная работа № 3.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛЬНОСТИ ТОПЛИВА.	18
Лабораторная работа № 4.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ.	23
Лабораторная работа № 5.	
ПРОВЕРКА КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРОСТЕЙШИМИ МЕТОДАМИ.	29
ЛИТЕРАТУРА.	34
ПРИЛОЖЕНИЯ.	35

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

Учебное издание

Коротинский Виктор Андреевич, **Андрейчик** Алла Евгеньевна,
Синица Светлана Ивановна

ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
И ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Методические указания

Ответственный за выпуск В. А. Коротинский
Редактор Н. А. Антипович
Компьютерная верстка А. И. Стебуля

Подписано в печать 01.11.2010 г. Формат 60×84^{1/16}.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 2,54. Тираж 150 экз. Заказ 1188.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.
Пр. Независимости, 99-2, 220023, Минск.