

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МИСиС»  
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра математики и естествознания

А.Н. Смирнов, Д.И. Алексеев

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ЧАСТЬ I**

*Учебное пособие*

Новотроицк, 2022 г.

УДК 662.749:519.87(075.8)

ББК 35.512:22.18я73

С 506

**Рецензенты:**

*Доцент кафедры «Химии» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова»,*

*к.т.н. Л.Г. Коляда*

*Ведущий специалист НТЦ ГАДП ПАО «ММК», к.т.н. Е.Н. Степанов*

Смирнов А.Н., Алексеев Д.И. Математическое моделирование химико-технологических процессов. Часть 1: учебное пособие. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2022. – 103 с.

В первой части пособия приводится краткий обзор истории производства основного продукта коксохимического производства – каменноугольного доменного кокса и подробно рассматриваются показатели качества исходных углей и шихты для коксования, определение которых соответствует стандартам ГОСТа, ISO. Эти показатели используются в качестве входных параметров математических моделей, описывающих процесс производства кокса, а сами показатели кокса, главным образом его механические свойства, – как выходные параметры.

Пособие предназначено для студентов направлений подготовки 18.01.04, 18.03.01 Химическая технология, изучающих дисциплины: «Коксование углей», «Моделирование химико-технологических процессов», «Химическая технология топлива и углеродных материалов» (18.03.01), «Анализ и синтез химико-технологических систем», «Механика дисперсных сред» (18.04.01) в качестве основной или дополнительной литературы очной и заочной форм обучения

ISBN 978-5-903472-39-0

© Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Новотроицкий филиал 2022

## Содержание

Введение.....	3
1. Математическое моделирование химико-технологических процессов. Основные понятия.....	5
2. Изобретение коксования, каменноугольный кокс – патенты, стандарты .....	11
3. Показатели качества исходных углей и шихты для коксования - входные параметры модели .....	18
3.1. Показатель отражения витринита $R_0$ .....	23
3.2. Определение влажности .....	25
3.3. Определение зольности .....	26
3.3. Определение выхода летучих веществ .....	27
3.5. Пластометрические показатели, определяемые в аппарате Сапожникова.....	31
3.6. Индекс Рога.....	42
3.7. Определение пластических свойств на пластометре Гизелера .....	44
3.8. Число вспучивания по ИГИ-ВУХИН.....	51
3.9. Метод определения дилатометрических свойств ИГИ-ДМетИ.....	54
3.10. Определение выхода жидкоподвижных продуктов из пластической массы угля .....	57
3.11. Размолоспособность по Хардгроу .....	62
3.12. Низшая и высшая теплота сгорания.....	65
3.13. Химический анализ золы. Каталитическая активность золы угля при газификации .....	71
3.14. Определение спекаемости по Грей-Кингу.....	72
4. Контрольные вопросы и тесты .....	75
4.1. Контрольные вопросы к первому разделу.....	75
4.2. Контрольные вопросы ко второй главе.....	77
4.3. Контрольные вопросы к третьему разделу.....	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	93
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	94
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	97

## ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемое пособие планируется к изданию в трех частях, на базе которых будут созданы электронные образовательные ресурсы.

В первой части пособия приводится краткий обзор истории производства основного продукта коксохимического производства – каменноугольного доменного кокса, достаточно подробно рассмотрены показатели качества исходных углей и шихты для коксования. Эти показатели используются в качестве входных параметров математических моделей, описывающий процесс производства кокса.

Во второй части пособия будут рассмотрены оценки качества кокса, главным образом его механические свойства, среди которых принято выделять показатели первого и второго поколения. К показателям первой категории относят «холодные» испытания кокса, при которых не происходит нагрева пробы (например, показатели  $M_{10}$ ,  $M_{25}$  %). Физическая сущность указанных испытаний состоит в том, что на кокс воздействуют механически, а затем «подсчитывают» его стойкость к механическому разрушению. Это самый обширный класс испытаний. Ко второму поколению методов относят испытания кокса, при которых он, как и в доменной печи, подвергается реакции с углекислым газом  $CO_2$ . Далее, как и в методах первого поколения, проводят механическое воздействие на кокс и определяют его стойкость к разрушению (показатели  $CRI$ ,  $CSR$ ). Именно на показатели  $M_{10}$ ,  $M_{25}$  и  $CRI$ ,  $CSR$  ориентируются в своей работе доменщики, а при моделировании эти показатели используются в качестве выходных параметров математических моделей.

Третья часть пособия будет посвящена некоторым подходам к математическому моделированию. Здесь будут рассмотрены регрессионные модели, а также методы активного планирования и первичной статистической обработки данных. Изложение материала сопровождается решением конкретных примеров и задач.

Несмотря на то, что проблемы построения математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса обсуждаются уже с 50–60-х годов прошлого века, они актуальны и до сих пор.

Мы полагаем, что материал, который рассмотрен в пособии, будет способствовать лучшему пониманию достигнутых результатов в вопросах прогнозирования механической прочности доменного кокса и может быть полезен для «зарождения» новых подходов или идей.

## 1. Математическое моделирование химико-технологических процессов. Основные понятия

«Nullius in verba (Ничего со слов)».

Девиз Лондонского королевского общества<sup>1</sup>.

«Acta non verba (Не словом, а делом)».

Девиз династии Демидовых.

Слово «технология» произошло от латинских слов «techne» – мастерство, ремесло и «logos» – понятие, учение, следовательно, дословно слово «технология» можно перевести как «учение о ремёслах». Под технологией в широком значении этого слова понимают научное описание методов и средств производства (технологических процессов).

*Процесс* – это любое последовательное изменение характеристик предмета, явления, системы направленное на достижение определенного результата. *Процессы* подразделяются на:

*Естественные* – протекающие в природе самопроизвольно без воздействия человека (рисунок 1).



Рисунок 1 – Примеры естественных процессов

*Технологические (производственные)* – организуются и контролируются че-

---

В 1714 году Александр Данилович Меншиков был избран членом Лондонского королевского общества. Письмо о принятии было написано ему лично Исааком Ньютоном, черновик письма хранится в архиве Российской Академии Наук. Меншиков стал первым русским членом Королевского общества [1].

ловеком с целью переработки сырья в полуфабрикаты или продукты потребления (рисунок 2).

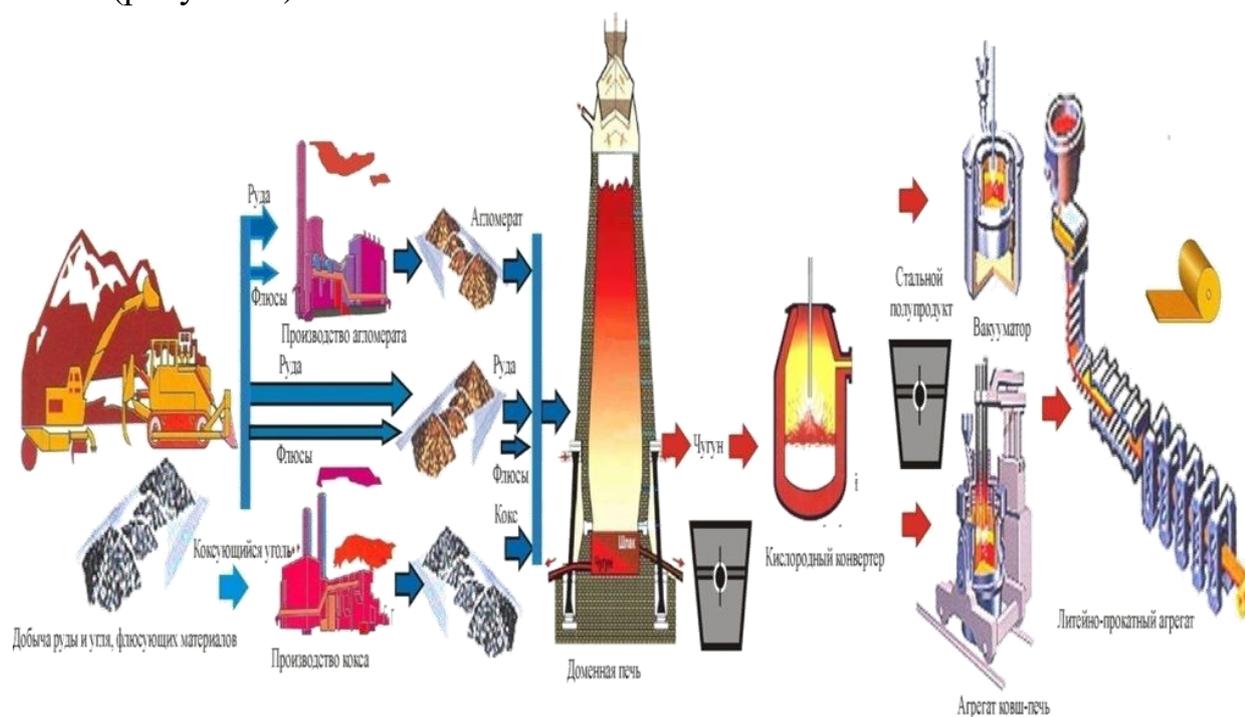


Рисунок 2 – Схема металлургического производства

Условно выделяют механическую и химическую технологии.

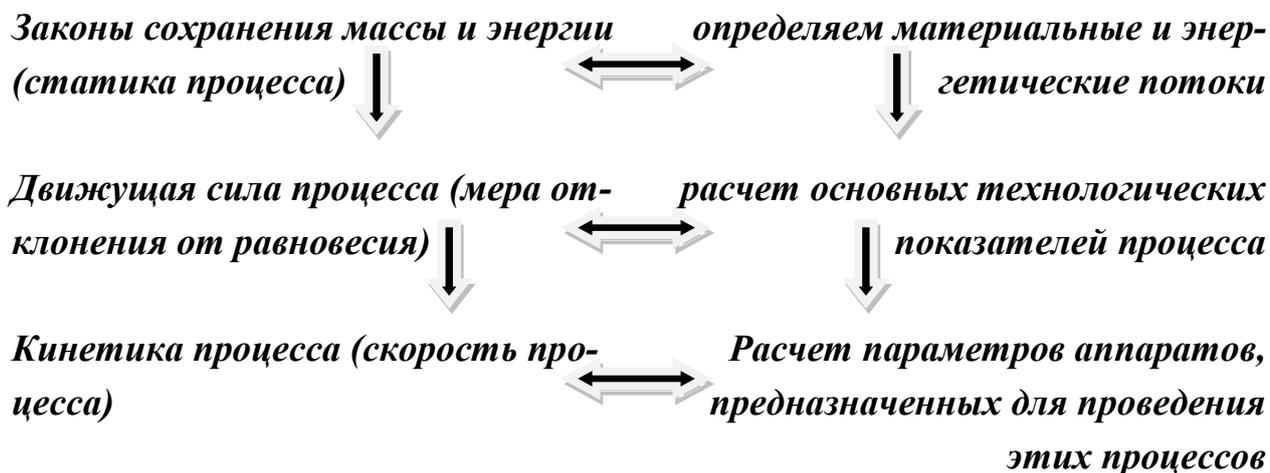
*Механическая технология* изучает процессы, в которых изменяются только физические свойства или форма перерабатываемых материалов. Например, методы и средства обработки металлов составляют предмет технологии металлов.

*Химическая технология* изучает набор физических и химических процессов и средств наиболее экономичных и экологически обоснованных методов переработки исходного сырья в предметы потребления и средства производства. В химических производствах исходное сырье превращается в целевой продукт в результате химического взаимодействия, которое сопровождается физическими, химическими и тепловыми процессами, которые вместе с химической реакцией составляют химико-технологический процесс (ХТП). Химико-технологический процесс складывается, как правило, из следующих взаимосвязанных элементарных стадий: 1) подвода реагирующих компонентов в зону реакции; 2) химических реакций; 3) отвода из зоны реакции полученных продуктов.

Общие принципы анализа ХТП можно представить в виде совокупной последовательности трех блоков (таблица 1), которые сочетают теоретический и эмпирический метод. В зависимости от закономерностей, характеризующих протекание ХТП, они классифицируются в рамках пяти групп: гидромеханиче-

ские, тепловые, массообменные, химические и механические, каждая из которых, имеет свою специфику, уровни сложности и конкретные закономерности. В связи с высокой степенью интеграции химико-технологических процессов, необходимостью их анализа и оптимизации в инженерной практике получил распространение подход, называемый моделированием.

Таблица 1 – Общие принципы анализа ХТП



*Моделирование* – это изучение объекта-оригинала с помощью замещающей его модели, включающее построение модели, её исследование и перенос полученных результатов на объект-оригинал (рисунок 3).

*Объект-оригинал* – объект, свойства которого подлежат изучению методом моделирования.

*Модель* – объект, отражающий свойства оригинала и замещающий его при проведении исследований. Модель повторяет не все свойства реального объекта, а только те, которые требуются для ее будущего применения. Можно сказать, что *модель* – это упрощенное подобие реального объекта, который отражает существенные особенности (принципиальные свойства) изучаемого реального объекта, отвечающие цели моделирования.

Для одного и того же объекта можно создать множество различных моделей. Какую модель выбрать – зависит от цели моделирования, определяемой в соответствии с решаемой задачей (например, геодезическая и туристическая карта одной и той же местности: при проведении инженерных или строительных работ важна первая, а для путешественника или туриста удобней вторая). С другой стороны, одна и та же модель может представлять разные объекты. Например, математические модели процесса распространения инфекционной болезни, процесса радиоактивного распада, химических реакций первого порядка являются одинаковыми с точки зрения их математического описания.

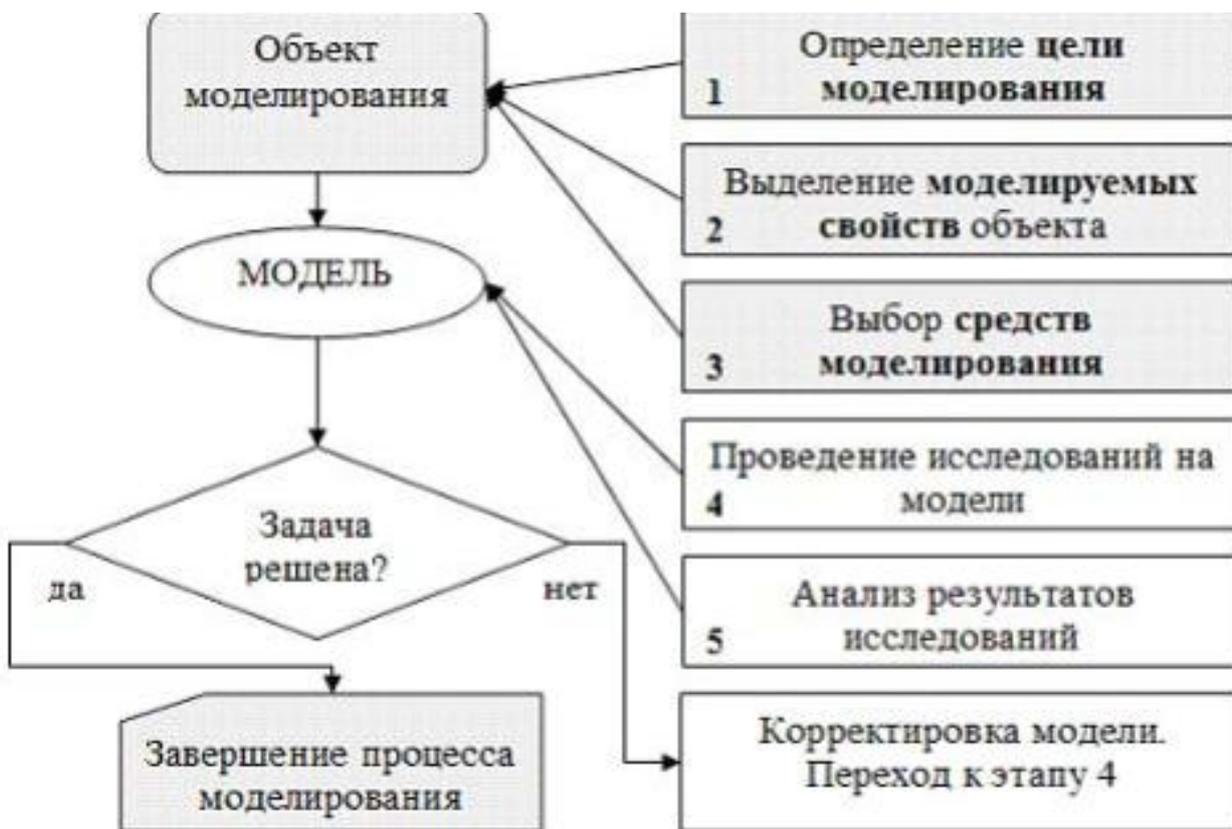


Рисунок 3 – Схематичное представление процесса решения задачи посредством моделирования [2]

Моделировать можно не только материальные объекты, но и процессы. Например, конструкторы используют аэродинамическую трубу для воспроизведения на земле условий полета самолета (рисунок 4).

Наибольшее распространение в инженерной практике получило *математическое и физическое моделирование* [2,3].

*Физическое моделирование* – это метод исследования на модели, которая имеет одинаковую с оригиналом физическую природу и воспроизводит весь комплекс свойств изучаемых явлений. В основе этого вида моделирования лежит принцип подобия (рисунок 4).

*Математическая модель* – это абстракция реального мира, в которой интересующие исследователя отношения между реальными элементами заменены определенными отношениями между математическими объектами. (*Приближенное описание какого-либо класса явлений или объектов реального мира на языке математики*). Математическая модель обычно представляет собой систему уравнений разного типа (дифференциальных, алгебраических и т.д.), устанавливающих количественные зависимости между рассматриваемыми величинами.

Инженеру-химику необходимо владеть методами построения матема-

тических моделей, поскольку характерной особенностью современных научных методов исследования сложных физико-химических процессов и технологических систем является создание математических моделей, описывающих процессы и предсказывающих изменение состояния изучаемых систем. Использование методов математического моделирования для анализа и расчета процессов химической технологии позволяет выявлять оптимальные условия проведения этих процессов. При этом становится возможным не только оптимально осуществлять сами процессы, но и оптимально управлять ими при нарушении режимов работы или изменении некоторых параметров. Кроме того, важным результатом моделирования является сокращение вариантов проведения эксперимента, так как все комбинации могут быть проверены на модели [3,4].



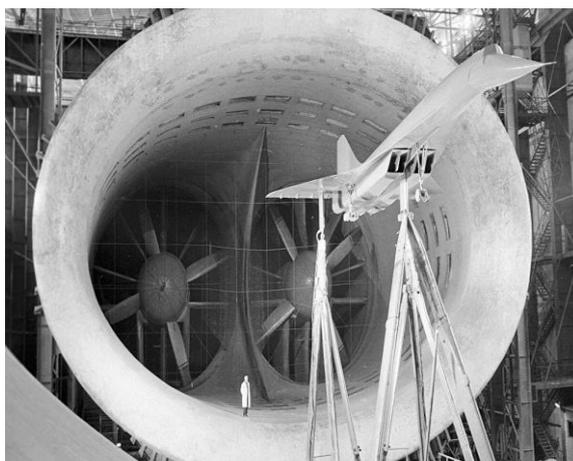
а)



в)



б)



г)

Рисунок 4 – Физическое моделирование. Объект (а,б) и его модель (в,г)

В пособии приводится краткий обзор истории производства основного продукта коксохимического производства – доменного каменноугольного кокса, способы и методы контроля его качества. Требования, предъявляемые к качеству каменноугольного кокса, различны в зависимости от его назначения<sup>2</sup>. Доменный кокс должен обладать достаточной механической прочностью, так как в противном случае он будет разрушаться под давлением столба шихты, что увеличит сопротивление движению газов, приведет к расстройству хода доменной печи, снижению ее производительности.

В качестве основных показателей качества доменного кокса в настоящее время принято считать показатели качества  $M_{25}$  и  $M_{10}$ , а в зарубежной практике показатели CSR и CRI [5].

---

<sup>2</sup> Например, для доменного, литейного или бытового кокса.

## 2. Изобретение коксования, каменноугольный кокс – патенты, стандарты

«В теории между теорией и практикой нет разницы,  
а на практике есть».

Думай как инженер. Как превращать  
проблемы в возможности. Гуру Мадхаван

Металлы являются материальной основой современной цивилизации. Особое место среди них занимают черные металлы – чугун, железо, сталь, обладающие способностью изменять свои технические характеристики в результате термической и механической обработки. Несмотря на появление новых неметаллических материалов с множеством полезных свойств, быстрый рост их производства и применения, они не способны полностью вытеснить из нашей техносферы металлы [5].

Качественным скачком в развитии черной металлургии был переход от получения металла в сыродутных «домницах» к выплавке чугуна в доменных печах. Первые доменные печи появились в Бельгии в середине XIV – первой половине XV в. в районе Люттиха (Льежа). В России первые доменные заводы – Верхне- и Нижне-Тулицкие, были построены «по голландским образцам» в 1632–1637 гг. на р. Тулице, в 12 верстах от Тулы. Первые уральские заводы с доменными печами были построены на реках Каменке, Нейве и Алапаевке. 15 октября 1701 г. доменная печь Каменского завода выдала первый уральский чугун, а спустя месяц начал действовать доменный цех Невьянского завода [6 - 10].

В связи с повсеместным истощением в Западной Европе лесов<sup>3</sup>, в XVIII в. там встал вопрос о переводе древесноугольной металлургии<sup>4</sup> на другие виды топлива [5]. Вероятно, первым, кому удалось достичь успехов в доменной плавке на каменном угле, был Дад Дадли (Dud Dudley). Он написал книгу (рисунк 5), которая представляет собой одновременно и автобиографию<sup>5</sup> и «за-

---

<sup>3</sup> Проблема эта серьёзно беспокоила все слои британского общества: многие тогда шутили, что «...если бы Иуда жил в Англии, то не нашёл бы осины, чтобы повеситься...».

<sup>4</sup> Достоверно не установлено, когда и в какой части планеты человек впервые определил, что обугливание древесины без сгорания позволяет повысить эффективность топлива. Разделение эндотермического процесса обугливания (удаления из древесины влаги, кислорода и водорода) и экзотермического процесса горения, которые «в условиях костра» происходят одновременно, позволило в случае применения древесного угля снизить потери тепла и получить существенно более высокую температуру.

щиту» изобретения. Считается фактом, что он действительно добился получения чугуна и ковкого железа удовлетворительного качества.



Рисунок 5 – Титульный лист книги Дада Дадли «*Metallum Martis*», или «Изготовление железа с использованием земляного угля и морского угля». 1665 г.

Большого количества металла в один прием он не производил – его доменная печь давала около 7 тонн чугуна в неделю, но себестоимость этого чугуна была очень низка: всего 4 фунта стерлингов за тонну против обычных 6–7 фунтов.

Первые опыты коксования каменного угля были осуществлены в Англии в начале XVII в. по аналогии с обугливанием древесины<sup>6</sup>. Позднее пригодные для получения кокса угли «переугливались» в тиглях, закрывавшихся глиняными крышками за счет доставляемой извне теплоты. Таким образом, можно утверждать, что проблема получения из угля прочного кускового материала,

---

<sup>5</sup> Дад Дадли умер, забытый всеми, в 1684 г., а вместе с ним «сошел в могилу» и его секрет.

<sup>6</sup> Кокс получался выжигом каменного угля в так называемых «кучах», где примерно треть угля сжигалась, и две трети превращались в кокс.

который можно было без опаски загружать в доменную печь, была решена задолго до 1735 г., когда Абрахам Дарби II пустил доменную печь, действующую только на каменноугольном коксе. Именно проблему использования высокосернистого (в сравнении с древесным углем) каменноугольного кокса при выплавке чугуна и удалось решить отцу и сыну Дарби. Они не разработали технологию коксования, а научились использовать большое количество кокса в доменной плавке, обеспечив переход серы в шлак и внося в технологию плавки изменения, обусловленные различием в физических свойствах древесного угля<sup>7</sup> и каменноугольного кокса [5].

Считается, что начало использованию каменного угля в химико-технологическом направлении положили работы немецкого химика Иоганна Бехера, который в 1681 г. затребовал патент<sup>8</sup> на «новый метод изготовления кокса и смолы из торфа и каменного угля, никем никогда ранее не открытый и не примененный»<sup>9</sup>.

Чем дороже становился древесный уголь, тем чаще появлялись патенты на использование минерального топлива<sup>10</sup>. Древние изобретатели и инженеры,

---

<sup>7</sup>Как известно, древесный уголь обладает существенно меньшей механической прочностью в сравнении с коксом, поэтому доменные печи, работающие на древесном угле, имеют меньшую высоту и больший диаметр в сравнении с доменными печами, работающими на коксе. На сегодняшний день в мировом углежжении и применении его продукции в металлургии фактическим монополистом является Бразилия, которая имеет огромные запасы самовосстанавливающегося биоресурса – эвкалипта. При должном подходе оборот рубки эвкалипта составляет всего 7 лет (для сравнения: оборот рубки хвойных деревьев на Урале 60-70 лет). Кроме того, сегодня вряд ли найдется человек, не имеющий представления о проблеме парниковых газов, одним из главных источников которых является использование ископаемого топлива, по данным некоторых исследований, весь процесс от посадки деревьев до производства товарного чугуна с применением древесного угля удаляет из атмосферы 1,1 т диоксида углерода на каждую тонну выплавленного чугуна. При производстве чугуна с применением кокса в атмосферу выделяется 1,8 т диоксида углерода. Таким образом, использование древесного угля вместо кокса может позволить уменьшить эмиссию диоксида углерода на 2,9 т/т чугуна.

<sup>8</sup> Патент (от лат. patens – свидетельство, грамота, или Litterae Patentes – открытая грамота).

<sup>9</sup> И.Бехер описывает свое изобретение так: «В Голландии имеется торф, в Англии каменный уголь, но и тот, и другой почти не употребляются для сжигания в доменных печах и для плавки. Я нашел путь, позволяющий превратить и тот, и другой в хорошее горючее, которое не только не дымит и не воняет, но и дает столь же сильный огонь, необходимый для плавки, как и древесный уголь...»

<sup>10</sup> Патент на производство железа и выплавку свинца «с использованием земляного угля, морского угля и торфа» ранее, чем Д. Дадли, получили в 1589 г. Томас Проктор и Виллиам Петерсон. В их патенте есть намеки на некий процесс подготовки угля, сходный с коксованием.

создававшие, например, песочные часы или колесо<sup>11</sup>, не задумывались о своих правах на собственные изобретения [11]. Однако рыночные отношения и усложнение технологий в корне изменили ситуацию: если изобретение можно усовершенствовать и продать дороже, то возникает конкуренция. Благодаря низкой себестоимости чугуна (4 фунта) Дадли составил серьезную конкуренцию другим заводчикам, и в результате завод Дадли подвергся нападению и был разгромлен, а сам Дадли, якобы за долги, был посажен в тюрьму<sup>12</sup>.

История патентного законодательства началась в Венецианской республике, где с 1450 г. стали выдаваться патенты. Был издан указ, предписывавший сообщать властям о реализованных на практике изобретениях, целью которого было предотвратить использование изобретений третьими лицами (рисунок 6 (а)) [11,12]. Когда венецианцы эмигрировали, они искали аналогичную патентную защиту в своих новых домах. Это привело к распространению патентных систем в другие страны. В России общий закон о привилегиях на изобретения принят в 1812 г. (до закона 1812 г. в России выдавались не патенты, а «привилегии»<sup>13</sup>). Советское патентное законодательство началось в 1919 г., когда В.И. Ленин подписал «Положение СНК об изобретениях». Патент был переименован в «Авторское свидетельство», отныне изобретатель был лишен права собственности на изобретение, которое объявлялось достоянием государства. За автором закреплялось право на вознаграждение в случае внедрения изобретения, создающего экономию в размере 2% от экономического годового эффекта. Ниже представлено авторское свидетельство № 1 на «Печь для непрерывного получения сернистого натрия», опубликованное 15 сентября 1924 г., заявка подана 25 марта 1921 г. (рисунок 6 (б)).

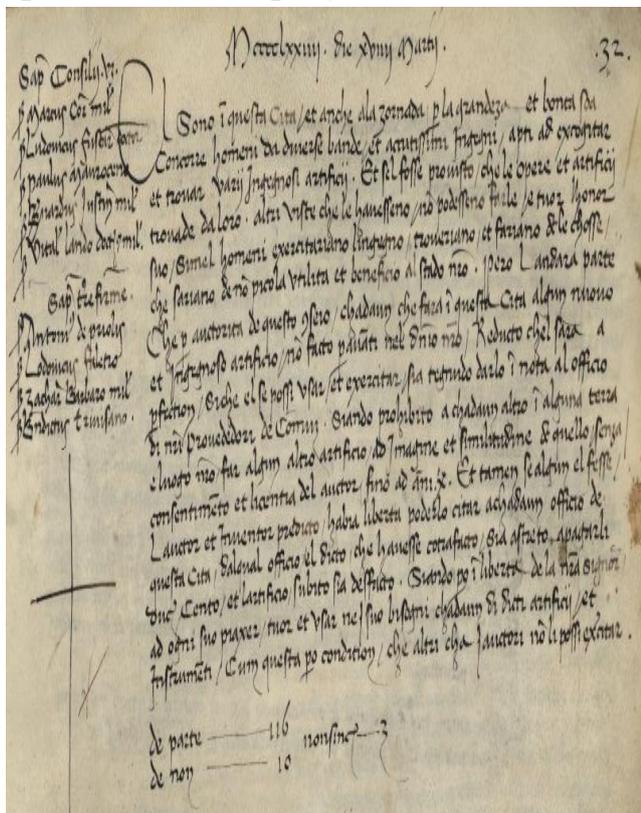
---

<sup>11</sup> Австралиец Джон Кео работал адвокатом, специализируясь на патентных делах, и весьма критически относился к законодательству в данной области. «Патентное бюро обязано выдавать патент на всё, что угодно, – сокрушался он. – Они просто ставят печать, ничего не проверяя». Чтобы показать недостатки системы, Джон решил запатентовать колесо. Свою заявку ушлый адвокат назвал «Круглое приспособление для облегчения транспортировки». Клерки патентного бюро почесали в затылке – и выдали ему патент. Чувство юмора австралийца по достоинству оценили организаторы Игнобелевской (у нас её называют Шнобелевской) премии. В 2001 г. он оказался в числе её лауреатов. Вместе с Джоном Кео премию в номинации «Технологии» получило Австралийское патентное бюро. Кео на церемонии не присутствовал (чиновники из бюро тем более), но прислал аудиозапись. «Я могу лишь надеяться, что присуждение премии послужит совершенствованию патентного законодательства Австралии, чтобы больше никто не смог запатентовать колесо».

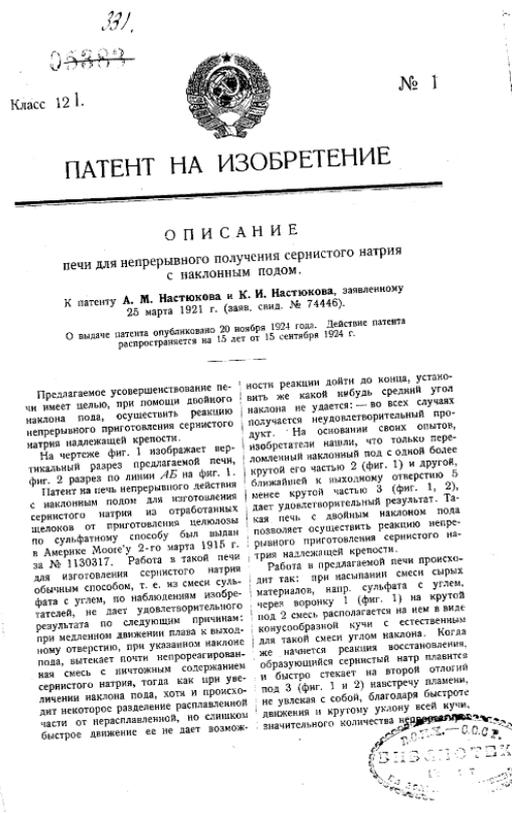
<sup>12</sup> В Средние века у многих талантливых изобретателей была нелегкая судьба: архитекторов, таких, например, как строителей соборов Московского Кремля, ослепляли, венецианских мастеров-стеклодувов запирали в пожизненной тюрьме на острове Мурано.

<sup>13</sup> М. В. Ломоносову в 1752 г. была пожалована привилегия на «делание разноцветных стекол, бисера, стекляруса и других галантерейных вещей».

Как отмечалось выше, рыночные отношения и усложнение технологий приводят к возникновению конкуренции, но, с другой стороны, настоятельно требуют, сделать так, чтобы несогласованности в рамках отдельной отрасли<sup>14</sup>, государства или мировых экономических цепочках стало как можно меньше. Это привело к созданию системы стандартов, схема видов и категорий которых представлена на рисунке 7.



a)



б)

Рисунок 6 – Венецианский патентный статут, изданный Сенатом Венеции в 1474 году, и авторское свидетельство № 1 на «Печь для непрерывного получения сернистого натрия», опубликованное 15 сентября 1924 году, заявка подана 25 марта 1921 года

<sup>14</sup> Начало истории российской государственной системы стандартизации было положено еще во времена правления Ивана Грозного, когда были стандартизированы размеры пушечных ядер, а для их измерения применялись стандартные калибры – кружала.

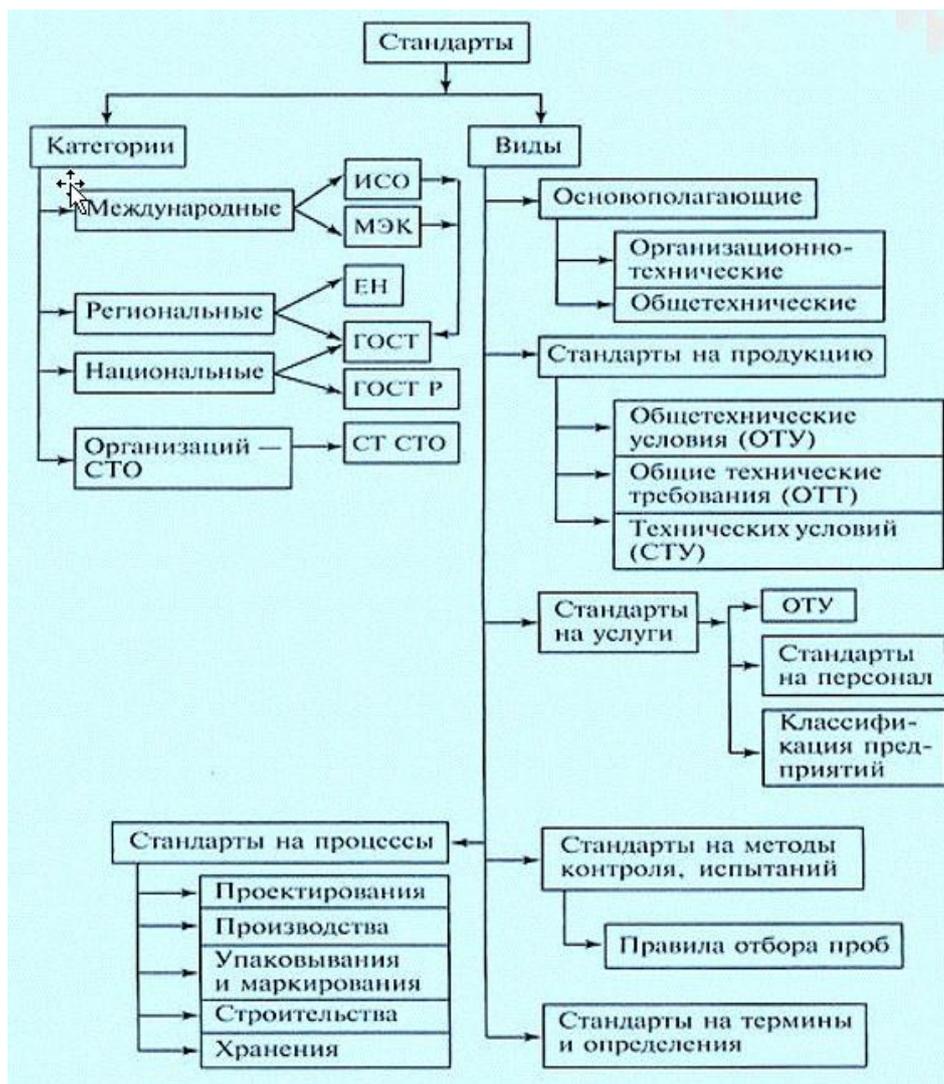


Рисунок 7 – Схема видов и категорий существующих стандартов  
«Аббревиатура «ГОСТ» означала: с 1940 года — «государственный общесоюзный стандарт»; с 1968 года — «государственный стандарт Союза ССР»; с 1992 года — «межгосударственный стандарт»

Первые попытки привести выпуск продукции под один стандарт<sup>15</sup> появились в 1925 г. Понятие ГОСТ или государственный общесоюзный стандарт введен в июле 1940 г., а нумерация ГОСТов утверждена 3 октября 1940 г. С этого момента всей выпускаемой продукции на территории СССР присваивался код стандарта. Позднее, для массовых товаров народного потребления были созданы упрощенные стандарты, технические условия (ТУ). ГОСТ описывает, каким должен быть производимый и продаваемый товар, его состав, техноло-

<sup>15</sup> Первым правовым актом, положившим начало советской стандартизации, был декрет 1918 г. Совета народных комиссаров (СНК) РСФСР «О введении Международной Метрической системы мер и весов». В дореволюционной России применялись сразу три системы мер (*старая русская, дюймовая английская и метрическая*), что приводило к путанице в сфере торговли, при изготовлении материалов, деталей, продуктов и пр.

гия. В современной России ГОСТы установлены в 1990 г. и являлись ГОСТами СССР, а с 1992 г. ГОСТы РФ имеют в названии букву «Р». 1 сентября 2011 г. соблюдение ГОСТа носит рекомендательный характер, за исключением товаров, которые напрямую касаются жизни и здоровья [13,14].

В связи с глобализацией экономической деятельности в середине XX в. возникла настоятельная необходимость в создании организации, целью которой должно было бы стать международное взаимодействие и унификация в сфере стандартизации. Аббревиатура ISO (International Organization for Standardization) обозначает международную организацию, занимающуюся вопросами стандартизации с 1946 г.<sup>16</sup> (рисунок 8). Одним из комитетов ISO ведутся разработки нормативов, касающихся менеджмента качества. Эти нормативы объединены в блок нормативов серии 9000 [15].

Начиная с 2001 г., в России действуют национальные аналоги данных стандартов. Это серия 900х-2001. Документы периодически дорабатываются и обновляются. Сертификация СМК по российскому стандарту не является легитимной для экспортной продукции. Требуется сертифицировать её по международному нормативу, что возможно выполнить только в специальных лабораториях, аккредитованных при ISO.

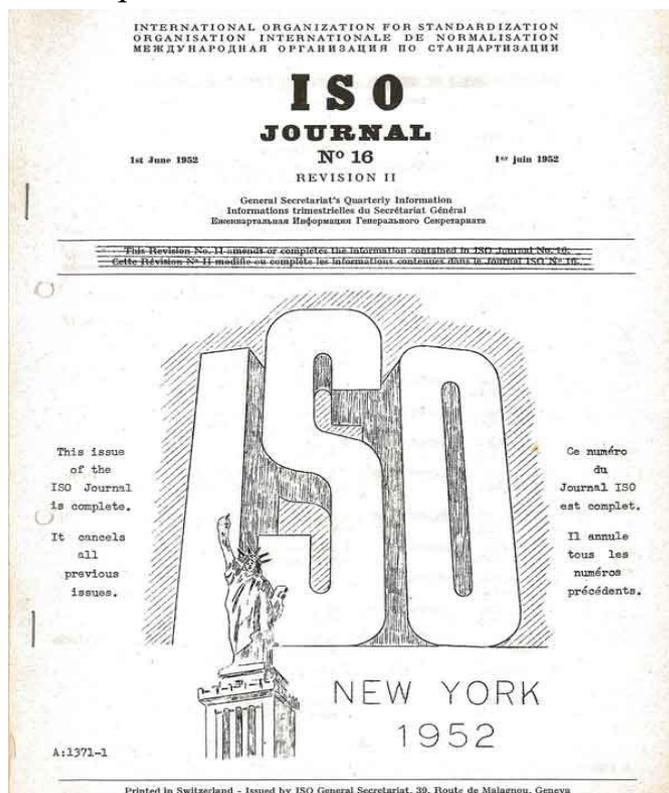


Рисунок 8 – Титульный лист журнала ISO 1952 г.

<sup>16</sup> Усилиями советской делегации, наряду с французским и английским, в качестве рабочего языка ISO был принят русский.

### 3. Показатели качества исходных углей и шихты для коксования - входные параметры модели

«У человека должен быть здравый смысл.  
Для всего остального есть ГОСТ».  
Всемирная паутина.

Отечественные и зарубежные модели в качестве выходных параметров применяют показатели качества кокса  $M_{25}$  и  $M_{10}$  или  $CRI$  и  $CSR$  [16-19]. Исходными данными для вычисления указанных параметров являются показатели качества исходных углей или шихты [16-18]. Потенциально для применения в модели возможно использовать параметры, которые можно определить на основе стандартных методов испытания угля (Приложение).

На практике исследователи используют не все показатели, а только те, которые достаточно быстро и с минимальными затратами возможно определить на коксохимическом производстве [20, 21]. Показатели качества углей и шихты, используемые в отечественных и зарубежных моделях, перечислены в таблице 2 и 3.

Таблица 2 – Технологические параметры коксования, используемые в отечественных и зарубежных моделях

Параметр
Насыпная плотность, $\text{кг/м}^3$
Масса угля, загружаемая в печь, кг
Скорость нагрева, $^{\circ}\text{C/мин}$
Время коксования, ч
Конечная температура коксования, $^{\circ}\text{C}$
Степень помола (размер частиц менее 3 мм), %
Содержание общей влаги $W_i^r$ , %
Температура стен камеры коксования, $^{\circ}\text{C}$
Температура горения отопительных газов, $^{\circ}\text{C}$
Температура предварительного нагрева (лабораторные испытания), $^{\circ}\text{C}$
Тип тушения, сухой или мокрый
Доля сухого тушения, %

Таблица 3 – Показатели качества шихты и исходных углей, используемые в отечественных и зарубежных моделях

Характеристика	Параметр	Название
Стадия метаморфизма	$R_{0,max}, \%$	Максимальное значение показателя отражения витринита
	$V_9 - V_{13}, \%$	Процент витринизированных компонентов угля или шихты, имеющих показатель отражения в диапазоне 0,9-1,3%
	$V_{11} - V_{13}, \%$	Процент витринизированных компонентов угля или шихты, имеющих показатель отражения в диапазоне 1,1-1,3%
	$V$ или $VM, \%$	Выход летучих веществ
	Без специального обозначения	Отношение элементного водорода к элементному кислороду
	$S_R$ или $\sigma_R, \%$	Среднеквадратическое отклонение показателя отражения витринита $R_0$
	$K_y$ , безразмерный	Индекс коксуетности
	Без специального обозначения	Суммарная активность
	$Vt, \%$	Содержание витринита
	$In, \%$	Содержание инертинита
	$OK, \%$	Сумма инертных (отощающих) компонентов
Состав и содержание золы	$A^d, \%$	Содержание золы
	$Na_2O, K_2O, CaO, MgO, Fe_2O_3, SiO_2, Al_2O_3$	Общее содержание оксидов металлов в золе
	$BI$	Индекс основности $BI = \frac{Na_2O + K_2O + CaO + MgO + Fe_2O_3}{SiO_2 + Al_2O_3}$

Характеристика	Параметр	Название
	<i>MBI</i>	Модифицированный индекс основности, включающий такие параметры как выход летучих веществ и содержание золы, а также содержание оксидов кислых и основных металлов. <i>MBI</i> $= \frac{100A^d(Na_2O + K_2O + CaO + MgO + FeO)}{(100 - V^{daf})(SiO_2 + Al_2O_3)}$ где <i>Na<sub>2</sub>O</i> , <i>K<sub>2</sub>O</i> , <i>CaO</i> ... – процентное содержание соответствующего оксида
Дополнительные свойства угля	<i>P<sub>0</sub></i> , безразмерный	Степень окисленности
	Отсутствует общепризнанный индекс, Один из вариантов обозначения <i>C<sub>T</sub></i> , %	Доля сухого тушения кокса на производстве
Показатели качества кокса	<i>CSR</i> , %	Горячая прочность
	<i>CRI</i> , %	Реакционная способность
	<i>M<sub>40</sub></i> , %	Показатель дробимости (крупность кокса более 40 мм)
	<i>M<sub>25</sub></i> , %	Показатель дробимости по Микум-испытанию (крупность кокса более 25 мм)
	<i>M<sub>10</sub></i> , %	Показатель истираемости по Микум-испытанию (крупность кокса менее 10 мм)
	<i>I<sub>25</sub></i>	Показатель дробимости по Ирсид-испытанию (крупность кокса более 25 мм)
	<i>I<sub>10</sub></i>	Показатель истираемости по Ирсид-испытанию (крупность кокса менее 10 мм)
	$DI \frac{150}{15}$	Показатель дробимости по японскому барабану (150 оборотов барабана, +15 мм размер фракции кокса)
Пластические свойства угля	<i>y</i>	Толщина пластического слоя, мм (в аппарате Сапожникова)
	<i>x</i>	Усадка, мм (в аппарате Сапожникова)
	$lg(MF)$	Десятичный логарифм максимальной текучести (максимальная скорость вращения мешалки, круговых делений в мин)

Характеристика	Параметр	Название
		(100 делений на 360 <sup>0</sup> ), кд/мин)
	<i>FSI</i>	Индекс свободного вспучивания
	<i>CSN</i>	Индекс вспучивания в тигле
	<i>G</i>	Фактор Симониса
	Китайский фактор	<i>G</i> Китайский аналог фактора Симониса

Полная номенклатура показателей качества углей, которую возможно определить в соответствии с действующими стандартами, приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Номенклатура показателей качества исходных углей и шихты для коксования (ГОСТ 33130-2014)

Наименование показателя	Условное обозначение
Марка	Д, ДГ, Г, ГЖО, ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, КСН, КС, ОС, ТС, СС, Т
Средний показатель отражения витринита, %	$R_0$
Высшая теплота сгорания, в пересчёте на влажное беззольное состояние, МДж/кг	$Q_s^{af}$
Выход летучих веществ, в пересчёте на сухое беззольное состояние, %	$V^{daf}$
Сумма фюзенизированных компонентов (I+2/3 Sv), %	$\Sigma OK$
Толщина пластического слоя, мм	$y$
Индекс Рога, ед	$RI$
Характеристика рефлектограммы. Стандартное отклонение $\sigma$ , число разрывов $n$	$V_V^{daf}$
Петрографический состав Содержание инертенита (I), липтинита (L), витринита (Vt), семивитринита (Sv), %	Витринит (Vt) Семивитринит (Sv) Липтинит (L) Инертенит (I)
Показатель свободного вспучивания	Номер профиля
Зольность, в пересчёте на сухое состояние, %	$A^d$
Массовая доля общей серы в пересчёте на сухое состояние, %	$S_t^d$
Высшая теплота сгорания в пересчете на сухое беззольное состояние топлива, МДж/кг	$Q_s^{daf}$

Наименование показателя	Условное обозначение
Низшая теплота сгорания в рабочем состоянии топлива, МДж/кг	$Q_i^r$
Массовая доля общей влаги, %	$W_i^r$
Массовая доля влаги аналитической пробе, %	$W^a$
Массовая доля хлора, в пересчете на сухое состояние, %	$Cl^d$
Массовая доля фосфора, в пересчете на сухое состояние, %	$P^d$
Массовая доля мышьяка, в пересчете на сухое состояние, %	$As^d$
Массовая доля ртути, в пересчете на сухое состояние, %	$Hg^d$
Содержание микроэлементов, %	Бериллий, бор, марганец, барий, хром, никель, кобальт, свинец, галлий, ванадий, медь, цинк, молибден, иттрий, и лантан
Элементный состав в пересчете на сухое беззольное состояние	С, Н, N, О, органическая S
Химический состав золы, %	$SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, MgO, CaO, K_2O, Na_2O, P_2O_5, TiO_2, SO_3, Mn_3O_4$
Показатели плавкости золы, °С	DT, ST, HT, FT
Низшая теплота сгорания в рабочем состоянии топлива, МДж/кг	$Q_i^r$
Коэффициент размолоспособности по Хардгроу	$HGI$
Выход классов крупности, %	$\gamma$
Массовая доля минеральных примесей, %	$\Gamma$
Выход гуминовых кислот, %	$(HA)_t^{daf}, (HA)_f^{daf}$
Индекс спекаемости	$G$
Тип кокса (спекаемость по Грей-Кингу)	A, B, C, D, E, F, G, G <sub>1</sub> и более G <sub>1</sub>
Дилатометрические показатели: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ температура размягчения, °С</li> <li>○ температура максимального сжатия (контракции), °С</li> <li>○ температура максимального расширения (дилатации), °С</li> <li>○ сжатие (контракция), %</li> <li>○ расширение (дилатация), %</li> </ul>	$t_I$ $t_{II}$ $t_{III}$ $a$ $b$
Окисленность, %	OK <sub>II</sub>

Методики, по которым определяют основные показатели качества исходных углей и шихты, приведены в следующих разделах.

### 3.1. Показатель отражения витринита $R_0$

Методика измерения показателя  $R_0$  заключается в следующем. Пробу кокса классом крупности порядка 1,0 – 1,6 мм добавляют к связующему полимеру (обычно шеллак) и изготавливают аншлиф брикет. Поверхность, предназначенная для наблюдения под микроскопом, не должна иметь трещин, дефектов полировки (царапин) или раковин. Аншлиф-брикет помещают в микроскоп, где его рассматривают в отражённом свете.

Под микроскопом находят зерно мацериальной группы витринита (рисунок 9) и устанавливают его в перекрестие окуляра микроскопа.

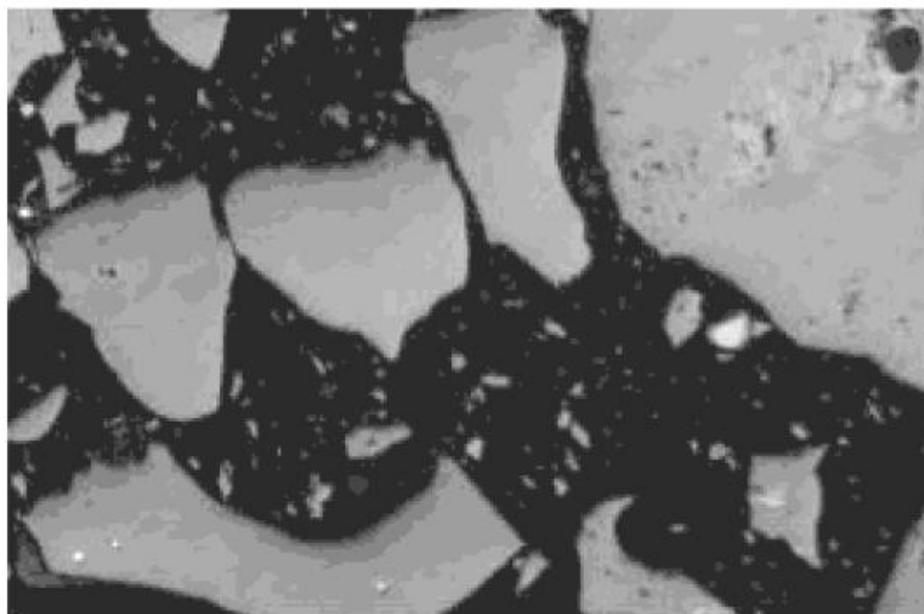


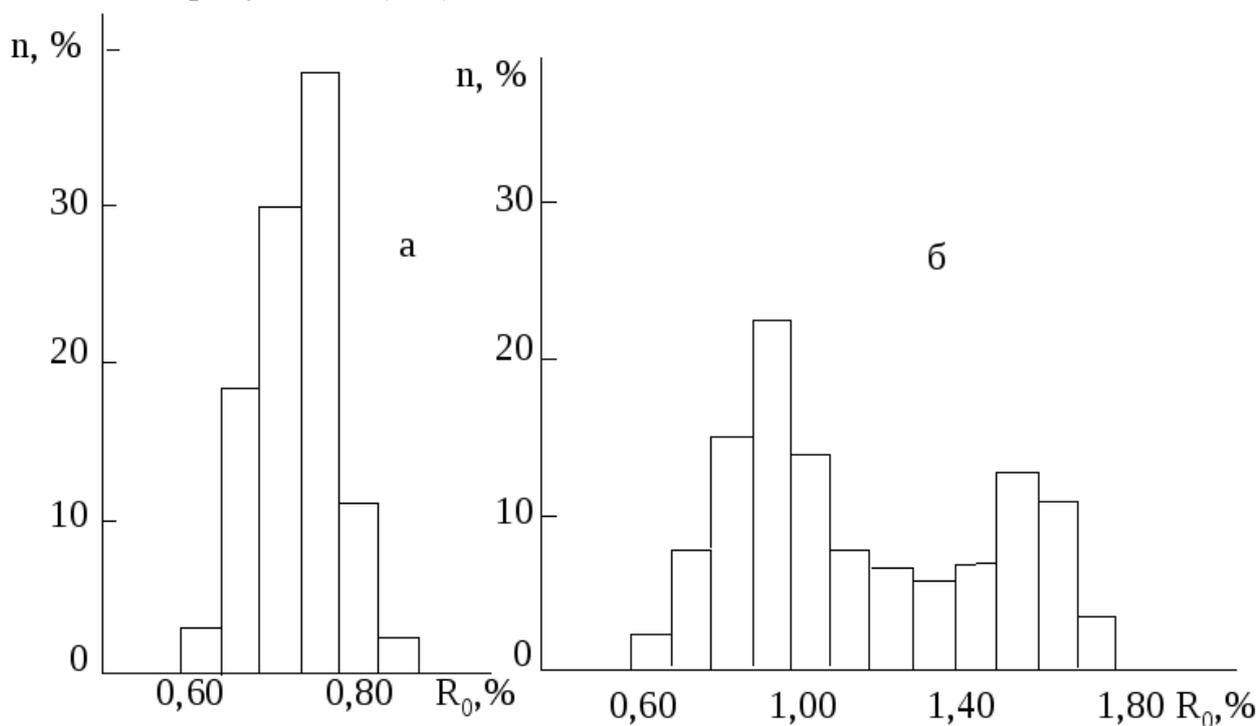
Рисунок 9 – Зёрна витринита под микроскопом

После наведения окуляра на зерно производят замер интенсивности отражённого от зерна света с помощью специальной приставки к микроскопу. Это и есть значение показателя отражения витринита. По методике, наведя окуляр и измерив интенсивность отражения витринита, производят вращения столика, то есть осуществляют поворот выбранного зерна под микроскопом. При этом показатель отражения витринита  $R_0$  может варьироваться. При вращении определяют минимальное значение показателя  $R_{0,min}$  и максимальное  $R_{0,max}$ . За итоговое значение  $R_0$  принимают среднее [22, 23].

Перемещают аншлиф-брикет в горизонтальном направлении с длиной шага 0,5 мм, производят измерения, когда перекрестие попадает на подходящую поверхность витринита. Таким образом, перемещаются от одного зерна

витринита к другому. Количество необходимых замеров зависит от цели анализа, от заданной прецизионности определения и от величины показателя отражения витринита анализируемой пробы. Это количество может изменяться от 50 до 1000 (или более) в зависимости от того, например, является ли целью анализа установление стадии метаморфизма индивидуального угля, или установление состава сложной угольной смеси с определением стадии метаморфизма каждой составляющей. Если исследуемый образец является угольной шихтой, то производят не менее 500 измерений от 500 различных зёрен витринита.

Исходя из количества зёрен витринита, у которых был определён показатель отражения витринита, можно построить рефлектограмму, пример которой показан на рисунке 10 (а, б).



а) мономарка угля; б) шихта, состоящая из двух мономарок угля

Рисунок 10 – Пример рефлектограмм

Дополнительно при исследовании аншлиф-брикета устанавливают петрографический состав, то есть принадлежность наблюдаемого зерна (микрокомпонента) к определённому классу, например, витринит, семивитринит, липтинит, микстинит и т.д. Данные о принадлежности зерна по ходу петрографического исследования заносят в механизированный счётчик, или специальная программа записывает данные на компьютер, и продолжают процесс перемещения по аншлиф-брикету. После окончания процесса перемещения по аншлиф-брикету, когда необходимое количество зёрен уже просмотрено, соотносят количество различных компонентов к общему числу просмотренных точек.

Так, например, содержание витринита 70,0 % означает, что из 500 просмотренных зёрен в аншлиф-брикете 350 зёрен оказались зёрнами витринита.

На основе данных петрографического анализа возможно рассчитать такие важные параметры, как сумма *спекающих* СК и *отощающих* ОК компонентов [25-28]:

$$СК = Vt + L + \frac{2}{3}Sv$$

$$ОК = Mi + \frac{1}{3}Sv$$

$$ОК = 100 - СК$$

где  $Vt$  – доля витринизированных компонентов, %;

$L$  – доля липтинитов, %;

$Sv$  – доля семивитринизированных компонентов, %;

$Mi$  – доля минеральных включений, %.

Показатели  $R_0$ , СК и ОК в том или ином виде входят практически во все модели для прогноза качества кокса, так как данные показатели отражают стадию метаморфизма углей, которая бесспорно влияет на прочностные свойства кокса [16, 17]. Кокс максимально возможного качества по показателям  $M_{10}$  и  $M_{25}$  получается из угольных шихт, имеющих значение  $R_0$  на уровне 1,125% и СК порядка 65%. Отметим, что оба показателя  $R_0$  и СК должны стремиться к указанным значениям одновременно, а среди компонентов угольной шихты не должно быть некоксуемых марок углей, таких, как Д, ДГ, Г, СС, Т. Отклонения от указанных значений для угольных шихт будет означать, что качество кокса по механическим свойствам будет ухудшаться. Из указанного правила существуют исключения, например, если в шихту добавляют угли марок К, Ж, ГЖ с Южно-Якутского угольного бассейна.

### 3.2. Определение влажности

Определение влажности угля или угольной шихты – это начальный этап технического анализа. К показателям технического анализа (ГОСТ Р 53357-2013) относят такие параметры, как влажность, зольность, выход летучих веществ. В математических моделях обычно учитывают все показатели технического анализа (таблицы 3 и 4).

Как правило, в моделях и на производстве учитывают общую влагу  $W_t^r$  (ГОСТ 27314-91), которая может быть определена по потере массы при высушивании. Существуют различные методы определения общей влаги и их исполнения, но самым распространённым является гравиметрический метод.

Пробу испытуемого угля или шихты массой 10 г взвешивают на аналитических весах и переносят в бюкс. Размер бюкса должен удовлетворять требованию: на 1 см<sup>2</sup> должно приходиться не более 0,3 г. Далее пробу просушивают в сушильном шкафу в течение 35 часов до постоянства массы пробы.

Расчёт общей влаги производится по формуле:

$$W_t^r = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_3 - m_2)} * 100$$

где  $m_1$  масса бюкса с высушенной пробой, г;

$m_2$  масса пустого высушенного бюкса, г;

$m_3$  масса бюкса с исходной пробой, г.

Принято считать, что увеличение влажности исходной шихты для коксования негативно влияет на механические свойства кокса. То есть чем больше значение параметра  $W_t^r$ , тем меньше, например, показатель  $M_{25}$  и больше  $M_{10}$ .

В техническом анализе определяют аналитическую влагу  $W^a$ . Для этого общую пробу испытуемого угля или шихты, имеющую влажность порядка 8-12%, высушивают в противнях в лаборатории (устанавливают состояние равновесия между влажностью угля или шихты и влажностью окружающей атмосферы помещения лаборатории). Проба угля или шихты при этом приходит в воздушно-сухое состояние. После определяют по гравиметрическому методу влажность высушенной в лаборатории пробы и определяют аналитическую влагу  $W^a$ , которая составляет порядка 2-4%. Масса пробы для определения аналитической влаги составляет 1 грамм (ГОСТ Р 529172008), остальная часть методики аналогична определению общей влаги  $W_t^r$ . Расхождения в параллелях при определении аналитической влажности не должны превышать 0,2%.

### 3.3. Определение зольности

Методика определения зольности угля аналогична определению влажности и основывается на гравиметрическом методе (ГОСТ Р 55661-2013). Общая проба угля или шихты та же самая, что и при определении аналитической влаги  $W^a$ , с крупностью частиц не более 0,2 мм.

Чистый сухой тигель (лодочку или лоток) взвешивают на аналитических весах, равномерно распределяют в нем приблизительно 1 г пробы и снова взвешивают. Лодочки или лотки перед применением обязательно проходят процесс прокаливания в течении 15 мин. при температуре  $815 \pm 10$  °С.

Тигли (лодочки или лотки) с навесками помещают в муфельную печь при комнатной температуре. Равномерно в течение 60 мин. нагревают муфельную

печь до температуры 500 °С. Выдерживают навески при этой температуре в течение 30 мин.

Продолжают нагрев муфельной печи до  $815 \pm 10$  °С или, при использовании двух печей, переносят тигли (лодочки или лотки) во вторую, уже нагретую до этой температуры печь. Выдерживают навески при температуре  $815 \pm 10$  °С не менее 60 мин. После окончания сжигания навесок топлива и прокаливания зольных остатков тигли (лодочки или лотки) вынимают из муфельной печи и помещают для охлаждения сначала на толстую металлическую плиту на 10 мин., а затем в эксикатор без осушителя. После охлаждения до комнатной температуры тигли (лодочки или лотки) взвешивают на аналитических весах.

Зольность аналитической пробы твердого топлива  $A^a$ , выраженную в процентах, вычисляют по формуле:

$$A^a = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100$$

где  $m_1$  - масса пустого тигля (лодочки или лотка), г;

$m_2$  - масса тигля (лодочки или лотка) с навеской топлива, г;

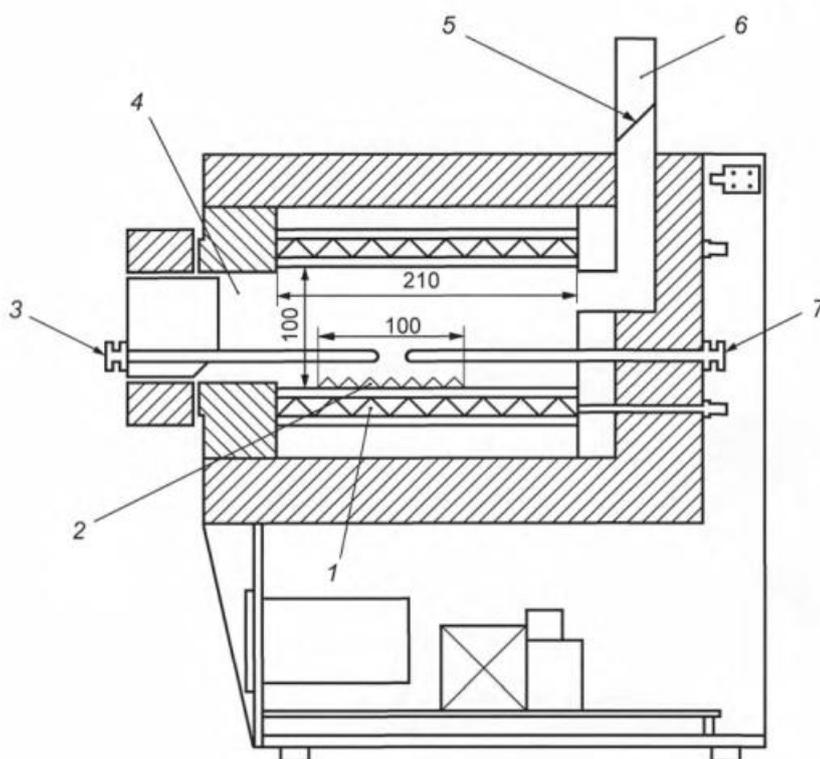
$m_3$  - масса тигля (лодочки или лотка) с золой, г.

Результат анализа, представляющий собой среднеарифметическое значение результатов двух параллельных определений, рассчитывают до второго и округляют до первого десятичного знака. Допустимое расхождение в параллелях составляет порядка 0,2-0,3% в зависимости от значения зольности  $A^a$ .

### 3.3. Определение выхода летучих веществ

Показатель выхода летучих веществ на сухую беззольную массу  $V^{daf}$  или выход летучих веществ на сухую массу  $V^d$  также можно увидеть практически в любой модели. Это можно объяснить тем, что данный показатель наряду с  $R_0$ ,  $СК$  и  $ОК$  отражает стадию метаморфизма углей.

Метод определения выхода летучих веществ относится к гравиметрическому (ГОСТ Р 55660-2013). Навеску воздушно-сухой пробы угля нагревают без доступа воздуха при температуре  $900 \pm 5$  °С в течение 7 мин. в муфельной печи (рисунок 11).



1 – нагревательная система; 2 – зона постоянной температуры;  
 3 – контрольная (не зачехлённая) термопара; 4 – камера муфельной печи  
 (ширина 200 мм); 5 – дроссельный клапан; 6 – отводная трубка; 7 – зачехлённая  
 термопара

Рисунок 11 – Схема муфельной печи

Выход летучих веществ в процентах рассчитывают по потере массы навески пробы за вычетом влаги с учётом веса тигля (рисунок 12). Расчётная формула выглядит следующим образом:

$$V^a = \frac{100(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - W^a$$

где  $m_1$  – масса пустого тигля с крышкой, г;

$m_2$  – масса тигля с крышкой и навеской пробы до испытания, г;

$m_3$  – масса тигля с крышкой и нелетучим остатком после испытания, г;

$W^a$  – влага аналитическая (раздел 3.2.), %.

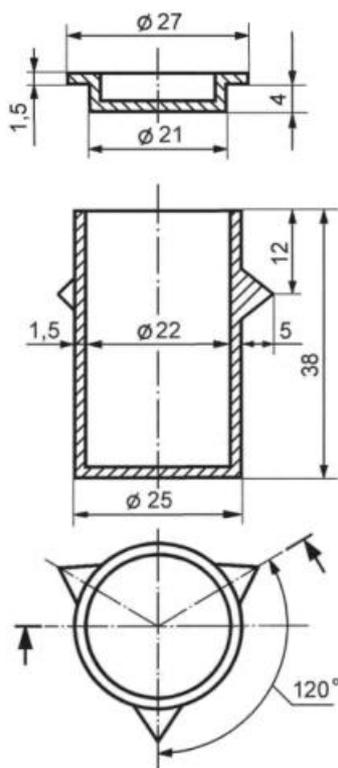


Рисунок 12 – Кварцевый тигель с крышкой

Зная результаты технического анализа, возможно представить информацию о влажности, зольности и выходе летучих веществ «на различную массу». Ниже приведены термины, обозначающие состояние топлива (ГОСТ 27313-2015).

**Рабочее состояние топлива** (индекс  $r$ ) – состояние топлива с таким содержанием общей влаги и золы, с которыми оно добывается, отгружается или используется.

**Аналитическое состояние топлива** (индекс  $a$ ) – состояние аналитической пробы топлива, влажность которого доведена до равновесного состояния с влажностью воздуха в лабораторном помещении.

**Сухое состояние топлива** (индекс  $d$ ) – состояние топлива, не содержащего влаги.

**Сухое беззольное состояние топлива** (индекс  $daf$ ) – условное состояние топлива, не содержащего влаги и золы.

**Органическая масса топлива** (индекс  $o$ ) – условное состояние топлива, не содержащего влаги и минеральной массы.

В таблице 5 приведены формулы пересчёта из одного состояния в другое.

Таблица 5 – Формулы взаимного пересчёта для состояний топлива

С какой массы производится пересчёт	Коэффициент пересчёта на указанное состояние				
	$r$	$a$	$d$	$daf$	$o$
$r$	1	$\frac{100 - W^a}{100 - W_t^r}$	$\frac{100}{100 - W_t^r}$	$\frac{100}{100 - (W_t^r + A^r)}$	$\frac{100}{100 - (W_t^r + MM^r)}$
$a$	$\frac{100 - W_t^r}{100 - W^a}$	1	$\frac{100}{100 - W^a}$	$\frac{100}{100 - (W^a + A^a)}$	$\frac{100}{100 - (W^a + MM^a)}$
$d$	$\frac{100 - W_t^r}{100}$	$\frac{100 - W^a}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^d}$	$\frac{100}{100 - MM^d}$
$daf$	$\frac{100 - (W_t^r + A^r)}{100}$	$\frac{100 - (W^a + A^a)}{100}$	$\frac{100 - A^d}{100}$	1	$\frac{100 - A^d}{100 - MM^d}$
$o$	$\frac{100 - (W_t^r + MM^r)}{100}$	$\frac{100 - (W^a + MM^a)}{100}$	$\frac{100 - MM^d}{100}$	$\frac{100 - MM^d}{100 - A^d}$	1

Примечание. 1) Дополнительную информацию о обозначениях и переводных формулах можно найти в ГОСТ 27313–2015.  
 2)  $MM$  минеральная масса угля или угольной шихты до температурного воздействия. Обусловлена наличием карбонатов, которые при нагреве более 700 °С разлагаются и не учитываются в такой характеристике как зольность.  
 3)  $A^r = A^a * \frac{100 - W_t^r}{100 - W^a}$

Стандарт по определению выхода летучих веществ предполагает также вычисление нелетучего углерода  $C_f^a$ , % в аналитической пробе по формуле:

$$C_f^a = 100 - (W^a + A^a + V^a)$$

Результаты представляют с точностью до 0,1%.

**Задача 1.** Перевести результаты технического анализа на рабочее и сухое состояние топлива. Данные технического анализа представлены в таблице 6.

**Решение.** После проведения технического анализа известны такие величины как общая влага  $W_t^r$ , аналитическая влага  $W^a$ , зольность аналитической пробы  $A^a$ , выход летучих веществ на аналитическое состояние  $V^a$ . Проведём расчёт по формулам пересчёта, приведённым в таблице 5.

$$A^r = A^a * \frac{100 - W_t^r}{100 - W^a} = 10,0 * \frac{100 - 8,0}{100 - 3,0} = 9,48 \approx 9,5\%$$

$$A^d = A^a * \frac{100}{100 - W^a} = 10,0 * \frac{100}{100 - 3,0} = 10,31 \approx 10,3\%$$

Таблица 6 – Результаты технического анализа и вычислений

Показатель технического анализа	Значение показателя на состояние топлива, %			
	рабочее $r$	аналитическое $a$	сухое $d$	сухое беззольное $daf$
Влага общая $W_t^r$ , %	8,0			
Влага аналитиче- ская $W^a$ , %		3,0		
Зольность $A$	9,5	10,0	10,3	
Выход летучих веществ, $V$	19,0	20,0	20,6	23,0
Нелетучий угле- род, $C_f$	63,5	67,0	69,1	77,0
Итого:	100,0	100,0	100,0	100

$$V^r = V^a * \frac{100 - W_t^r}{100 - W^a} = 20,0 * \frac{100 - 8,0}{100 - 3,0} = 18,96 \approx 19,0\%$$

$$V^d = V^a * \frac{100}{100 - W^a} = 20,0 * \frac{100}{100 - 3,0} = 20,61 \approx 20,6\%$$

$$V^{daf} = V^a * \frac{100}{100 - (W^a + A^a)} = 20,0 * \frac{100}{100 - (3,0 + 10,0)} = 22,98 \approx 23,0\%$$

$$C_f^a = 100 - (W^a + A^a + V^a) = 100 - (3,0 + 10,0 + 20,0) = 67,0\%$$

$$C_f^r = 100 - (W^r + A^r + V^r) = 100 - (8,0 + 9,5 + 19,0) = 63,5\%$$

$$C_f^d = 100 - (A^d + V^d) = 100 - (10,3 + 20,6) = 69,1\%$$

$$C_f^{daf} = 100 - V^{daf} = 100 - (23,0) = 77,0\%$$

**Ответ:** пересчитанные значения параметров влажности, зольности, выхода летучих с аналитического состава на рабочий, сухой и беззольный представлены в таблице 6.

### 3.5. Пластометрические показатели, определяемые в аппарате Сапожникова

Пластометрические показатели широко распространены и применяются на отечественных коксохимических предприятиях, а также при моделировании [24-28]. Пластическое состояние угля – очень важная характеристика, которая отражает важную стадию процесса коксования, а именно переход в пластическое состояние. Уголь в пластическом состоянии представляет собой коллоидную систему, состоящую из газообразной, жидкой и твёрдой фазы. При этом в угольной массе развивается давление распираания, которое позволяет обеспе-

чить контакт угольных зёрен между собой и при дальнейшем процессе нагревания без доступа воздуха образуется прочный остаток – кокс. Пластическое состояние угля можно характеризовать на основе различных испытаний. В отечественной практике самыми распространёнными показателями, отражающими свойства пластического состояния, являются параметры – толщина пластического слоя  $y$ , мм и усадка  $x$ , мм, которые измеряют в аппарате Сапожникова (ГОСТ 1186–2014). Аппарат Сапожникова – это сложный комплекс, на изучении составляющих которого мы подробно остановимся.

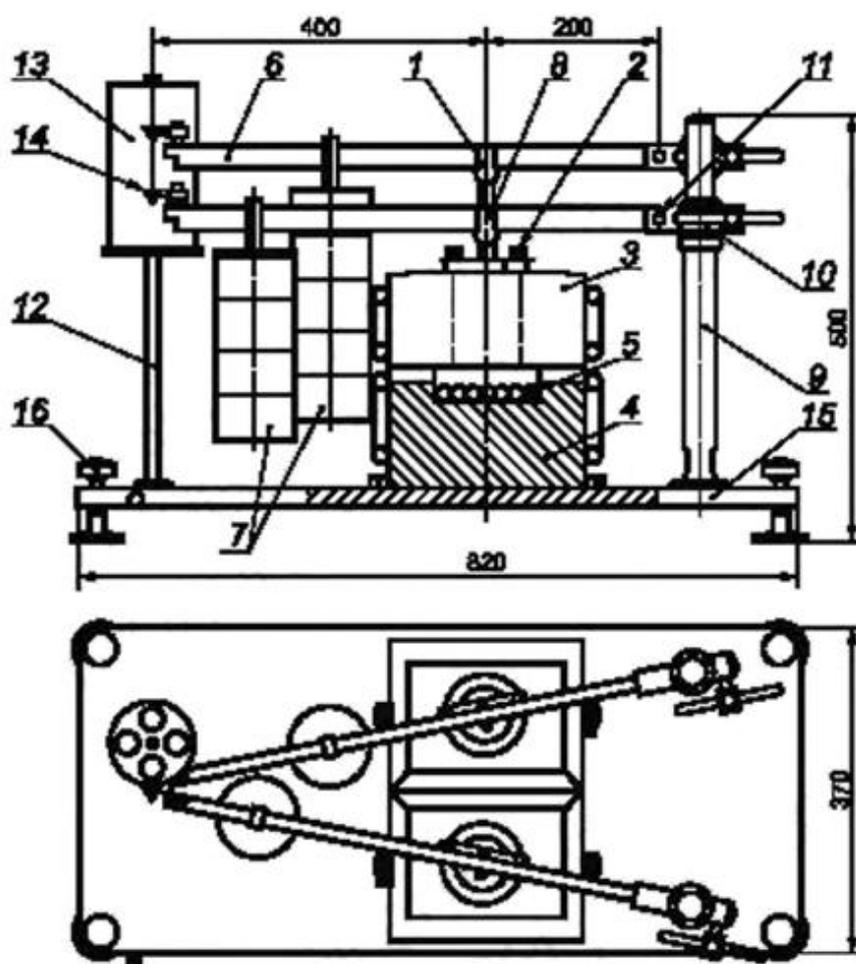
Сущность метода определения пластометрических свойств на аппарате Сапожникова заключается в методическом нагревании (по заданному режиму) под заданным давлением навески угля, загруженной в пластометрический стакан, и определении в процессе и по окончании нагрева:

— толщины пластического слоя угля. Это максимальное расстояние между поверхностями раздела уголь-пластическая масса и массы-полукокс, данная величина обозначается как  $y$ , мм;

— величины пластометрической усадки угля – это конечное изменение высоты угольной загрузки по окончании испытания, обозначается как  $x$ , мм;

— вида пластометрической кривой – кривой, выражающей объёмные изменения угольной загрузки в зависимости от времени нагрева. Пластометрическая кривая является качественным показателем, однако ее вид также относится к характерным признакам конкретного угля.

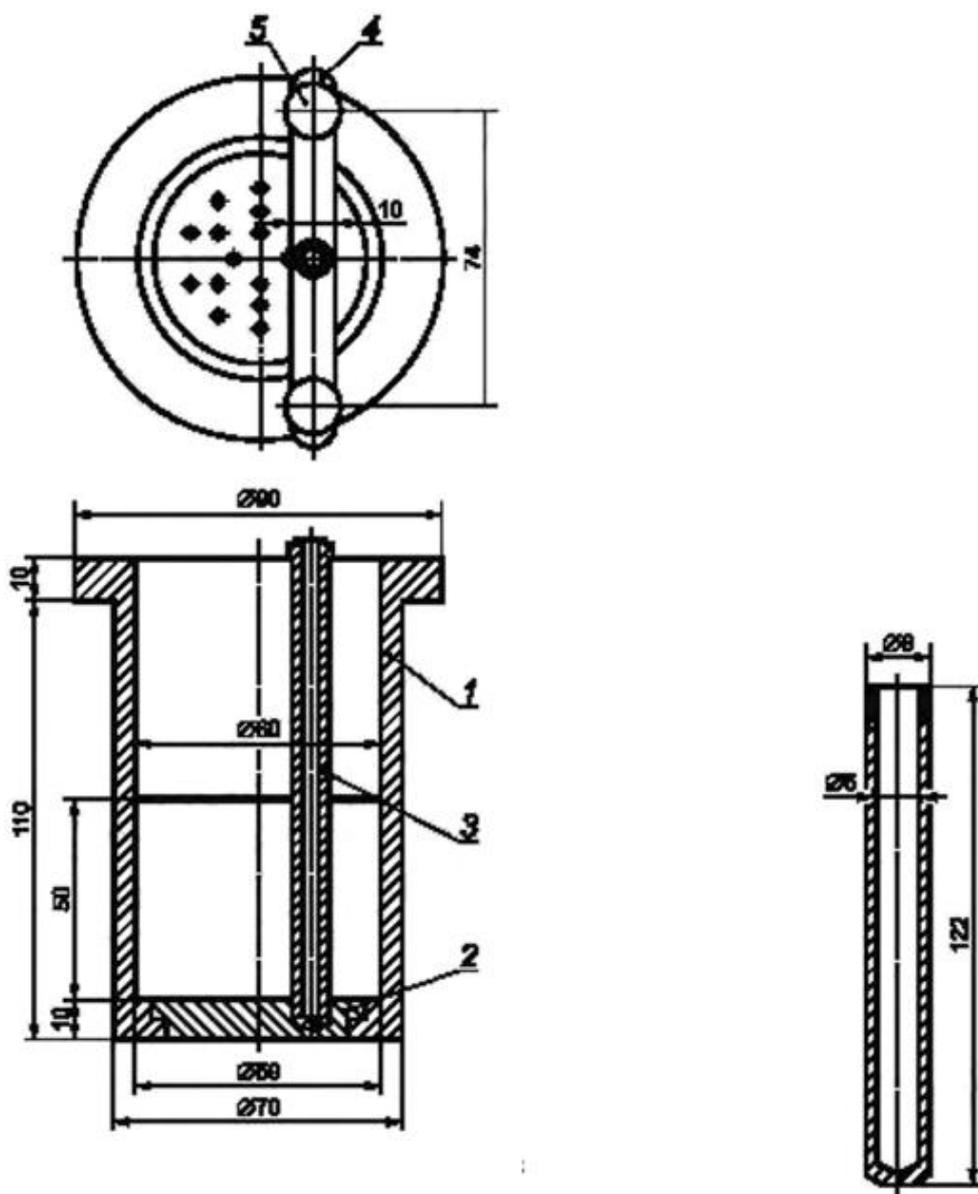
Классическое исполнение (без средств автоматизации) пластометрического аппарата показано на рисунке 13. Пластометрический стакан (рисунок 14) выполнен из жаропрочной стали со съёмным дном. Диаметр стакана, мм: наружный – 70; внутренний на уровне дна – 59; внутренний на высоте 50 мм от дна и выше – 60. Диаметр стакана в его конусной (рабочей) части проверяют через каждые 100 экспериментов, проводя три измерения по высоте через каждые 25 мм. Отклонение от среднего диаметра конусной части стакана (59.5 мм) не должно превышать  $\pm 0.5$  мм. Конусность необходима для того, чтобы при развитии давления распирающего в процессе испытания угольный корольок не выдал дно стакана. В этом случае возможно возгорание отходящих газов и королька, так как стакан устанавливается на электронагревателе (позиция 5, рисунок 13). В стакан (рисунок 14) устанавливается трубка с заглушенным нижним концом для термопары.



- 1 – штемпель; 2 – стакан; 3 – верхний кирпич; 4 – нижний кирпич;  
 5 – нагреватель; 6 – рычаг; 7 – груз; 8 – шарнирный; 9 – стойка;  
 10 – муфта; 11 – шарнирный валок; 12 – стойка барабана; 13 – барабан;  
 14 – перо; 15 – плита; 16 – установочный винт

Рисунок 13 – Общий вид аппарата Сапожникова

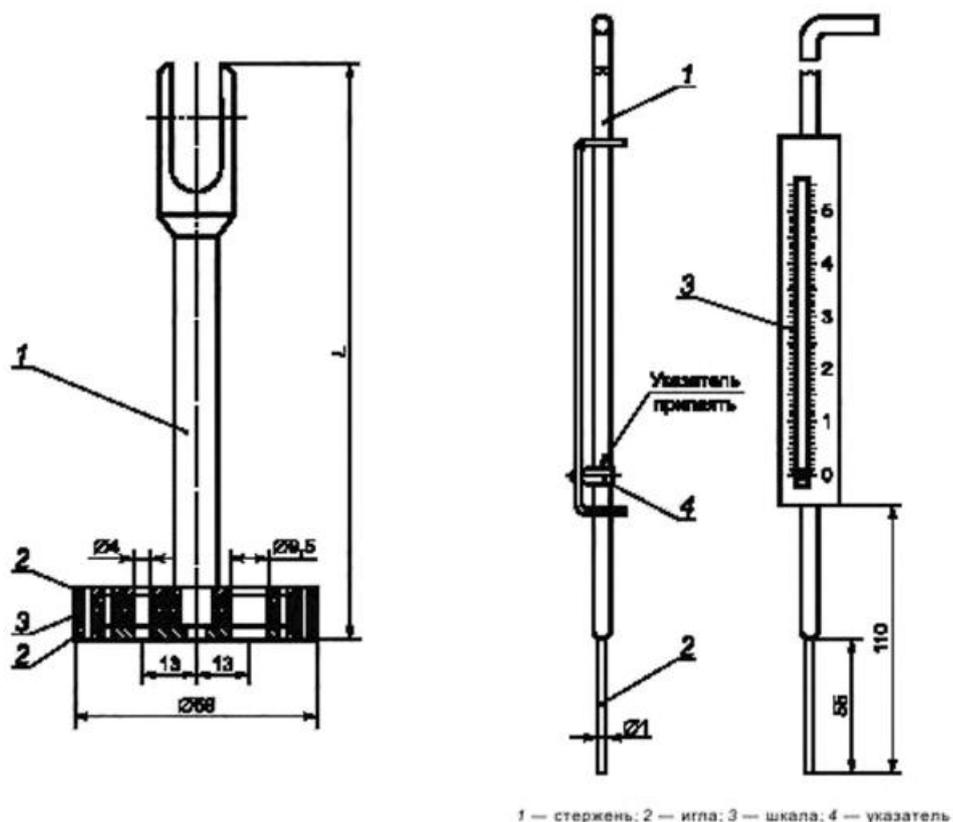
В стакан сверху устанавливается штемпель (рисунок 15) с отверстиями для удаления летучих веществ. Штемпель опирается непосредственно на угольную загрузку и через шток передает ей усилие от рычажного механизма (позиция 6 на рисунке 13) создания заданного давления. Непосредственное измерение толщины пластического слоя производят иглой (рисунок 15), состоящий из стержня, стальной иглы цилиндрической формы диаметром 1 мм и высотой 55 мм, указателя, укрепленного неподвижно на стержне пластометра, и передвижной металлической шкалы.



1 – корпус; 2 – доньшко; 3 – трубка для термопары; 4 – прижимная планка; 5 – прижимной винт

Рисунок 14 – Стакан пластометрический в сборе и трубка для термопары

Цена деления шкалы – 1 мм, толщина штрихов на шкале – 0,1 – 0,2 мм. В качестве опоры для иглы при измерении толщины пластического слоя служит планка (позиция 4 на рисунке 14, рисунок 16). Для создания вертикального отверстия в угольной загрузке в начале испытания устанавливают спицу диаметром 2–3 мм и длиной 150–200 мм в отверстие диаметром 4 мм в штемпеле (рисунок 15).



1 – шток (для переднего стакана длина 140 мм, для заднего стакана – 210 мм); 2 – верхняя и нижняя тарелки; 3 – асбестовая прокладка. Игла (изображение справа): 1 – стержень; 2 – игла; 3 – шкала; 4 – указатель  
 Рисунок 15 – Штемпель и игла пластометра. Штемпель (изображение слева)

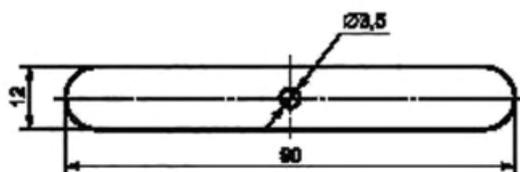


Рисунок 16 – Опорная планка для замеров

Подготовка лабораторной пробы осуществляется следующим образом. Отобранную на предприятии угольную общую пробу массой 1 кг и размером частиц угля 0–3 мм рассеивают на сите с размером ячеек 1,6\*1,6 мм. Надрешётный продукт додрабливают до размера зерен менее 1,6 мм и смешивают с подрешетным продуктом. Содержание класса <math><0,5</math> мм в полученной пробе не должно превышать 40% по массе. Наличие большого количества мелочи оказывает влияние на конечный результат. Пробу угля перед испытанием доводят до воздушно-сухого состояния (раздел 3.2.). Зольность пробы не должна превышать 10 %. При зольности свыше 10 % производят обогащение пробы.

Перед загрузкой пробы угля в пластометрический стакан цилиндрическую поверхность стакана выстилают полоской фильтровальной бумаги. Устанавливают трубку для термопары. Надевают на нее и опускают на дно асбестовый кружок с одним отверстием. Трубку для термопары закрепляют прижимной планкой. На спице сворачивают бумажную трубочку, загибают конец на 2–3 мм и устанавливают в отмеченном месте асбестового кружка, соответствующего отверстию в штемпеле. Далее следует загрузка угольной пробы.

Навеску воздушно-сухого угля массой  $100 \pm 0,1$  г, отобранную от лабораторной пробы методом квартования, загружают в стакан в четыре приема равными порциями. После каждой порции поверхность угля в стакане разравнивают, но не утрамбовывают. На уголь помещают второй асбестовый кружок. Выступающие края фильтровальной бумаги, выстилающей цилиндрическую поверхность стакана, загибают поверх кружка. Устанавливают штемпель и закрепляют прижимную планку.

Пластометрический аппарат позволяет работать одновременно на двух стаканах (рисунок 13), то есть проводить испытание в параллелях, хотя стандарт допускает проведение только одного испытания (ГОСТ 1186–2014). После установки стакана в аппарат соединяют штемпель с рычагом с помощью штифтов. К рычагам подвешивают грузы (всего четыре гири). В трубки для термопар вставляют термопары так, чтобы они касались дна трубок.

Для аппаратов (рисунок 13) на барабане с часовым механизмом закрепляют полосу миллиметровой бумаги, соответствующую по ширине и длине размерам барабана. На бумаге самописец откладывает значения усадки во время проведения испытания. В современных вариантах аппарата Сапожникова усадку измеряют по расстоянию от гирь (позиция 7, рисунок 13) до плиты (позиция 15, рисунок 13) с помощью лазера-дальномера, установленного на уровне плиты.

Через 30 минут после включения нагрева аппарата с загруженным стаканом температура, измеряемая термопарой на дне стакана, должна достигнуть  $250^{\circ}\text{C}$ . В интервале от  $250$  до  $730^{\circ}\text{C}$  скорость нагрева должна составлять  $3^{\circ}\text{C}$  в минуту.

Замеры толщины пластического слоя иглой-пластометром начинают, когда нижний слой угля переходит в пластическое состояние. Об этом свидетельствует снижение пластометрической кривой ниже начального уровня. Для измерения *верхнего уровня* пластического слоя иглу-пластометр через отверстие в планке осторожно опускают в трубочку из папиросной бумаги, которая была оставлена на спице (спицу перед началом анализа вынимают). Когда конец иглы коснется пластического слоя, записывают показания шкалы иглы-

пластометра в миллиметрах. При этом иглу-пластометр из рук не выпускают, чтобы он не погружался в пластический слой под действием собственного веса.

Для измерения *нижнего уровня* пластического слоя иглой-пластометром прокалывают пластическую массу до тех пор, пока игла не упрется в твердый слой полукокса.

Частота измерений верхнего уровня пластического слоя зависит от характера пластометрической кривой. График, построенный по точкам замера верха пластического слоя, повторяет характер пластометрической кривой. Низ пластического слоя рекомендуется замерять не чаще одного раза в 8–10 мин, чтобы не нарушать естественный характер пластометрической кривой.

Примеры характерных типов пластометрических кривых пластического слоя показаны на рисунках 17–19.

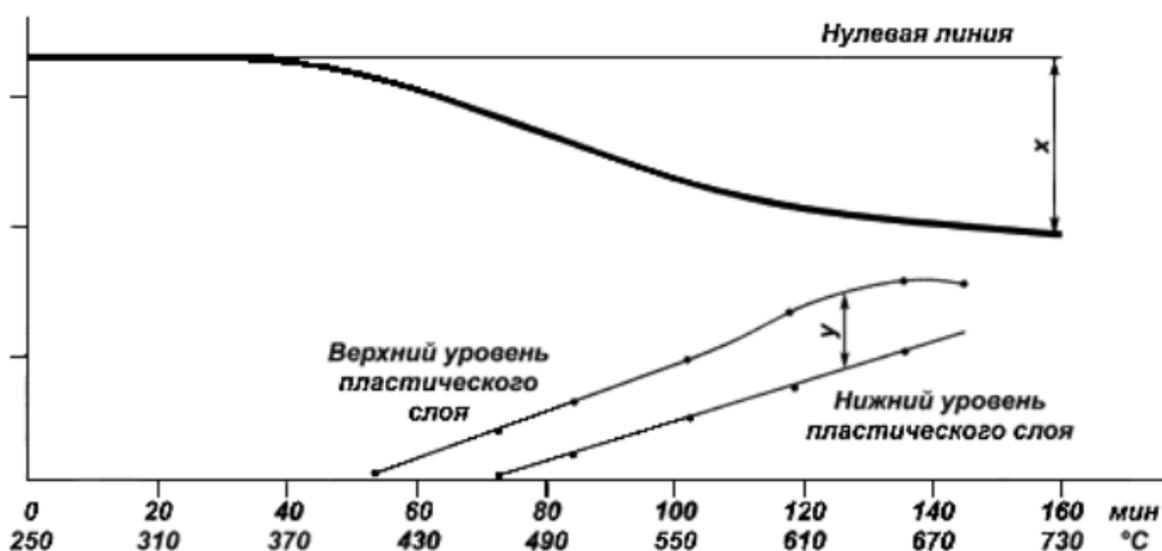


Рисунок 17 – Пример пологопадающей кривой

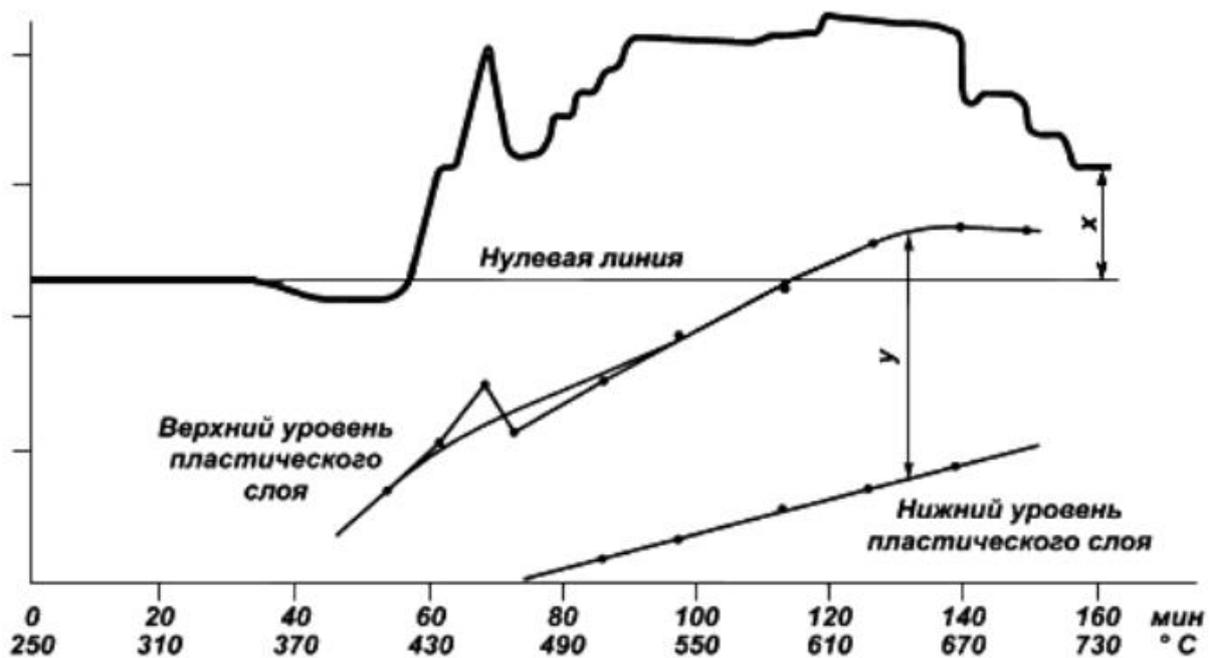


Рисунок 18 – Горбообразная кривая с отрицательной усадкой

По достижении температуры 730°C останавливают испытание и отключают нагрев пластометрического аппарата.

Значение толщины пластического слоя  $y$ , мм устанавливают по пластометрической кривой. За испытуемое значение  $y$  берут максимальное значение толщины пластического слоя, получающегося на основе пластометрической кривой (рисунки 17–19). Усадка  $x$  представляет собой величину отклонения уровня угольной загрузки в стакане от исходного значения после проведения эксперимента (рисунки 17–19).

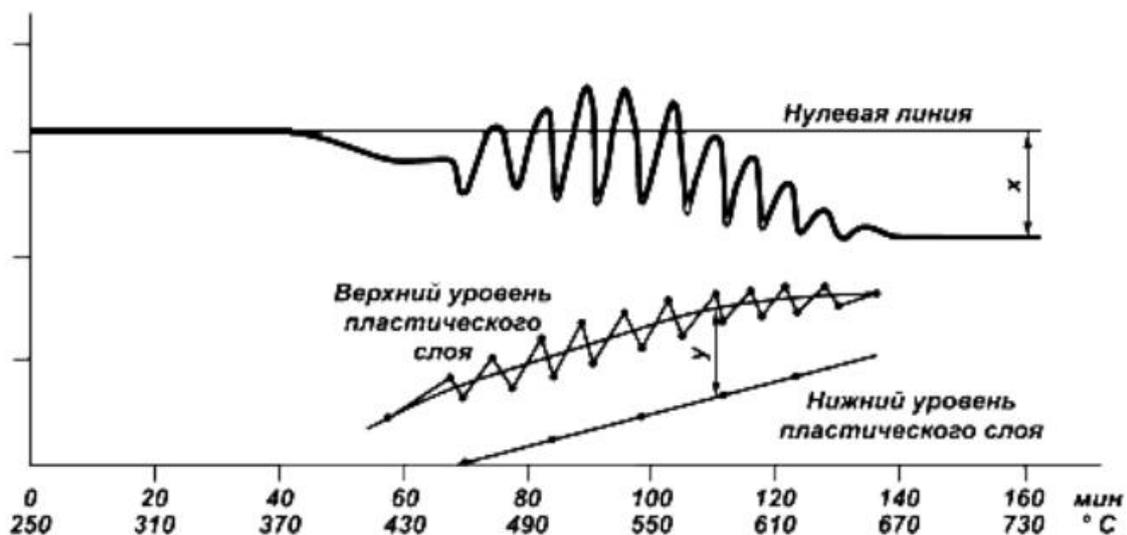


Рисунок 19 – Пример зигзагообразной кривой («вспучивающийся» уголь)

**Задача 2.** Определить нагрузку на испытываемую угольную пробу при испытании в аппарате Сапожникова. Оценить высоту столба угольной шихты, эквивалентной нагрузке при испытании в аппарате Сапожникова.

**Решение:** выполним схематичный рисунок, воспроизводящий основные элементы рычага аппарата Сапожникова (рисунок 20).

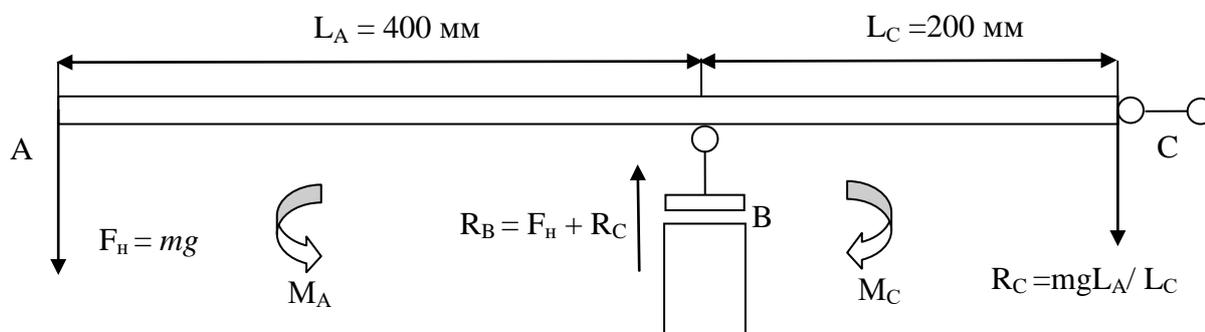


Рисунок 20 – Схема нагрузок, возникающих при испытании в аппарате Сапожникова

При приложении нагрузки в точке A, что соответствует навешиванию гирь на рычаг (рисунок 13), в плече AB возникает изгибающий момент  $M_A$ . По этой причине в шарнире C возникает сила-реакция опоры  $R_C$ , направленная на компенсацию изгибающего момента  $M_A$ , то есть возникает момент  $M_C$ . Поскольку рычаг не вращается, а находится в равновесии, то происходит полная компенсация моментов, то есть момент  $M_A$  равен  $M_C$ :

$$M_A = M_C$$

Момент по определению равен силе, умноженной на плечо:

$$M = F * l$$

$F$  – сила, Н;

$l$  – длина плеча, м.

Сила, которая действует на рычаг, – это сила тяжести. Найдём значения силы реакции опоры.

$$\begin{aligned} F_H &= mg \\ mgL_A &= R_C L_C \\ R_C &= \frac{mgL_A}{L_C} \end{aligned}$$

После возникновения уравновешивающей силы  $R_C$  возникает реакция опоры уже в точке B от угольной загрузки, на которую действует штемпель, соединённый шарниром с рычагом.  $R_B$  уравновешивает нагрузку и реакцию опоры шарнира C

$$R_B = F_H + R_C = mg + \frac{mgL_A}{L_C}$$

$$\frac{L_A}{L_C} = \frac{400}{200} = 2$$

$$R_B = 3mg$$

Масса гирь составляет примерно 12 кг. С другой стороны, нагрузке при испытании в аппарате Сапожникова  $R_B$  можно сопоставить нагрузку, которую оказывает столб угольной шихты. Для оценки этой нагрузки воспользуемся основным уравнением гидростатики и взаимосвязью между давлением и силой (рисунок 21):

$$\Delta p = \rho gh$$

$$F_\Gamma = pS$$

где  $\Delta p$  – избыточное давление, которое оказывают верхние слои шихты в загрузке камеры коксования, Па;

$\rho$  – в рассматриваемом случае, насыпная плотность шихты, кг/м<sup>3</sup>;

$h$  – высота слоя шихты, который находится выше рассматриваемого слоя, м;

$F_\Gamma$  – сила, которая действует на площадку, к которой приложено давление, Н;

$p$  – давление, которое действует на рассматриваемую площадку, Па;

$S$  – площадь рассматриваемой площадки, м<sup>2</sup>.

Необходимо отметить, что сыпучие материалы, к которым можно отнести шихту для коксования, условно подчиняются основному гидравлическому уравнению (расчёт  $\Delta p$ ). Для сыпучих материалов давление будет меньше за счёт распределения нагрузки на боковые слои шихты, что не наблюдается для жидких веществ. Однако сделанное замечание не уменьшит значимости расчёта, так как мы оценим минимальное значение столба угольной загрузки, которое эквивалентно нагрузке при испытании в аппарате Сапожникова.

Эквивалентность рассматриваемых нагрузок:

$$F_\Gamma = R_B$$

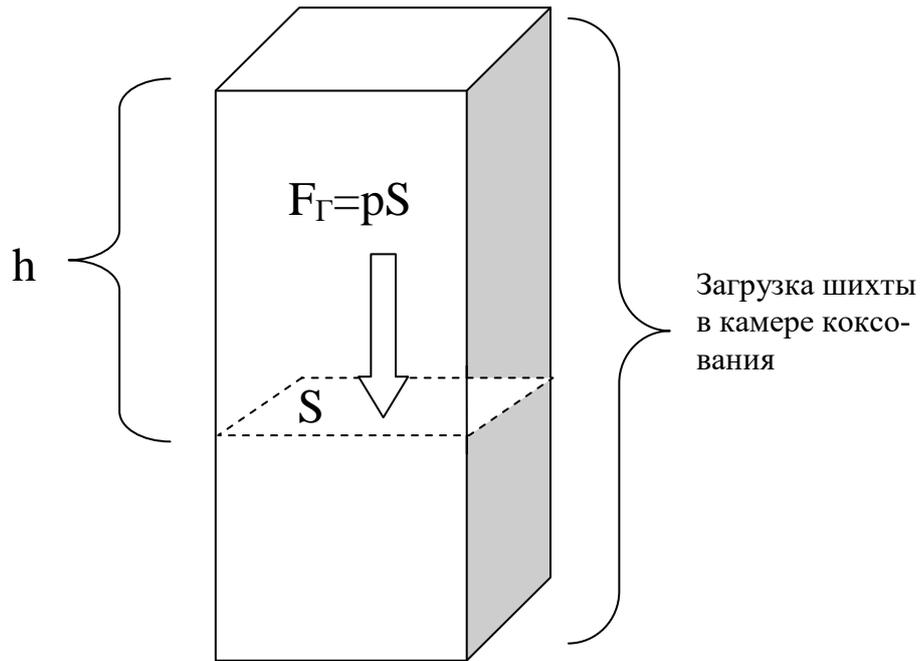


Рисунок 21 – Рассмотрение нагрузки, которую можно сопоставить с нагрузкой при испытании в аппарате Сапожникова

Распишем каждую из сил и выразим высоту столба угольной загрузки.

$$\rho ghS = 3mg$$

$$h = \frac{3m}{\rho S}$$

Насыпную плотность примем  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$  (сухая шихта). Площадь с учётом диаметра пластометрического стакана (рисунок 14 и 15) можно рассчитать по известной формуле. Диаметр для удобства примем  $60 \text{ мм} = 0,06 \text{ м}$ .

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 * 0,06^2}{4} = 0,0028 \text{ м}^2$$

Рассчитаем высоту столба угольной шихты, эквивалентную нагрузкам при испытании в аппарате Сапожникова.

$$h = \frac{3 * 12}{800 * 0,0028} = 15,9 \text{ м}$$

Современные коксовые батареи имеют максимальную высоту в 9 м. Таким образом, расчёт показал, что в аппарате Сапожникова создаётся избыточная нагрузка, отличная от условий в камере коксования. Аналогичный расчёт при условии нагрузки в 6 кг (две гири при испытании в аппарате Сапожникова) эквивалентен 8 м столба угольной шихты, что примерно соответствует нагрузке, которую испытывают слои угля при коксовании у пода (низ) камеры коксования.

### 3.6. Индекс Рога

Данный показатель широко распространён в зарубежных моделях в качестве показателя для оценки пластических свойств угля [16, 17]. Целью испытания по методу Рога является определение спекающей способности угля в стандартных условиях. Спекающую способность угля по Рогу определяют по механической прочности кокса, полученного в тигле при карбонизации в стандартных условиях смеси – 1 г угля и 5 г эталонного антрацита. Полученный в тигле кокс затем испытывают в барабане строго установленным способом и по результатам вычисляют индекс Рога (ГОСТ 9318-91).

Пробу испытываемого воздушно-сухого угля измельчают до размеров менее 0,2 мм. Измельчение проводят осторожно, чтобы избежать переизмельчения и чтобы не менее 40 % всей пробы состояло из частиц размерами 0,1-0,2 мм. Тщательно усредняют пробу не менее 1 мин после измельчения и пробного отсева. При испытании требуется антрацит (кодированный номер 100А) с зольностью на сухое состояние менее 4 % и выходом летучих веществ на сухое беззольное состояние топлива от 5 до 6,5%. При испытании используют узкую фракцию антрацита 0,3-0,4 мм.

По методике взвешивают фарфоровый тигель с наружным диаметром у вершины  $40 \pm 1,5$  мм и наружным диаметром у основания  $20 \pm 1,5$  мм, помещают в него 1 г угля и 5 г эталонного антрацита, взвешенные с погрешностью не более 0,01 г, то есть на технических весах. Тщательно перемешивают уголь и антрацит в течение 2 мин, разравнивают поверхность пробы в тигле и помещают на нее стальной груз. Груз выполнен из жаропрочной стали массой 110-150 г, диаметром 31 мм, высотой 21 мм, с нарезным отверстием в центре диаметром 7 мм и глубиной 10-12 мм, в которое может ввинчиваться стержень для извлечения груза из тигля. После смесь угля и антрацита с грузом в тигле прессуют (рисунок 22) в течение 30 с, прикладывая нагрузку в 6 кг.

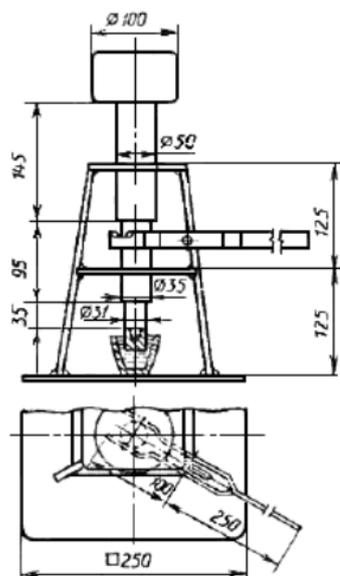


Рисунок 22 – Пресс для уплотнения смеси антрацита и испытуемого угля

Тигель с прессованной смесью помещают в муфельную печь при температуре  $(850 \pm 10)^\circ\text{C}$ . После нагревания в течение 15 мин вынимают тигель из печи и оставляют его охлаждаться на асбестовом листе в течение 45 мин. После охлаждения вынимают груз из тигля с помощью стержня. Тигель после прокаливания в муфеле со снятым грузом взвешивают с точностью 0,01 г. Переносят содержимое тигля на сито с ячейкой 1 мм. Крупинки кокса более 1 мм вновь переносят в тигель, вновь взвешивают тигель с просеянным коксом.

Далее содержимое тигля переносят в барабан, конструкция которого представлена на рисунок 23. Соединяют барабан с валом, включают секундомер и вращают барабан в течение 5 мин со скоростью  $50 \pm 2 \text{ мин}^{-1}$ . Извлекают кокс из барабана и снова его просеивают. Переносят кокс, оставшийся на сите, в тигель, используя щипцы или пинцет. Снова взвешивают тигель с содержимым. Переносят содержимое тигля в барабан и закрывают его крышкой. Возвращают кокс из тигля в барабан и повторяют процедуру истирания, просеивания и снова взвешивают надрешетный продукт точно так же, как описано выше. Выполняют третье испытание на истираемость при тех же условиях, просеивают и взвешивают конечный надрешетный продукт. Все взвешивания производят с погрешностью не более 0,01. Испытания проводят в параллелях.

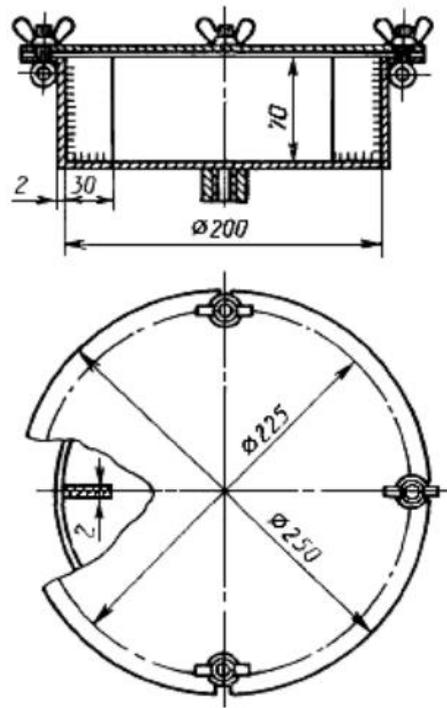


Рисунок 23 – Барабан для испытания на истираемость

По окончании испытания рассчитывают индекс Рога по формуле:

$$RI = \frac{100}{3m_1} \left( \frac{m_2 + m_5}{2} + m_3 + m_4 \right)$$

где  $m_1$  – общая масса кокса в тигле после карбонизации, г;

$m_2$  – масса кокса, оставшегося на сите перед первым испытанием на истираемость, г;

$m_3$  – масса кокса, оставшегося на сите после первого испытания на истираемость, г;

$m_4$  – масса кокса, оставшегося на сите после второго испытания на истираемость, г;

$m_5$  – масса кокса, оставшегося на сите после третьего испытания на истираемость, г.

### 3.7. Определение пластических свойств на пластометре Гизелера

Данный метод испытания широко распространён в зарубежных странах [16, 17]. Измерение пластических свойств угля осуществляется путем непрерывного измерения и регистрации скорости вращения мешалки, запрессованной вместе с угольной загрузкой в тигель (ГОСТ Р 54247-2010). Тигель помещен в ванну, нагреваемую с постоянной скоростью подъема температуры и непрерывной ее регистрацией. Вращение мешалки осуществляется двигателем с постоянным заданным вращающим моментом.

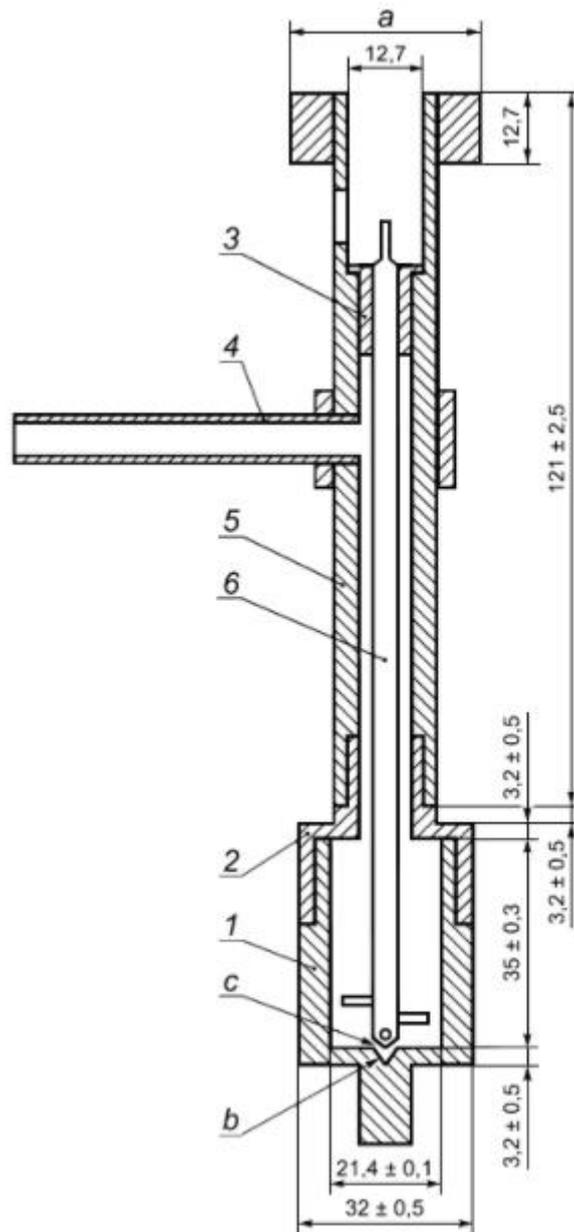
Реторта пластометра Гизелера состоит из следующих частей (рисунок 24). Тигель реторты цилиндрический с внутренним диаметром 21,4 мм и глубиной 35,0 мм. В верхней части тигля нарезана наружная резьба для соединения с крышкой. Тигель должен иметь в центре дна коническое углубление с углом при вершине  $70^\circ$  и диаметром по поверхности дна  $(2,38 \pm 0,2)$  мм, которое служит опорой мешалки.

Крышка тигля реторты имеет внутреннюю резьбу для соединения крышки тигля с ретортой и внешнюю резьбу для соединения с кожухом реторты.

Внутренний диаметр отверстия в крышке, через которую проходит мешалка, должен быть  $(9,5 \pm 0,1)$  мм.

Направляющая втулка запрессована в кожух около верхнего края мешалки и имеет зазор по отношению к валу мешалки от 0,05 до 0,10 мм.

Отверстие в кожухе на середине его длины служит для удаления летучих веществ. При желании в него может быть установлена трубка. Цилиндрический кожух длиной  $(121,0 \pm 2,5)$  мм с внутренним диаметром  $(9,5 \pm 0,1)$  мм. Верхний конец кожуха должен иметь внутренний диаметр 12,7 мм и глубину, достаточную для установки направляющей втулки, через которую проходит мешалка, когда реторта собрана.



1 – тигель; 2 – крышка тиглей; 3 – направляющая втулка; 4 – трубка отвода газа; 5 – цилиндрический кожух; 6 – металлическая мешалка; а – диаметр муфты (подгоняется по месту); б – угол при вершине  $70^{\circ}$ ; с -16 мм зазор между нижней лопастью и дном тигля

Рисунок 24 – Реторта пластометра Гизелера

Стальная мешалка, снабженная прямым валом диаметром  $(3,95 \pm 0,05)$  мм и оснащенная четырьмя лопастями. Нижний конец мешалки должен быть заострен на конус под углом  $60^{\circ}$ . Лопасты на мешалке должны быть диаметром  $(1,60 \pm 0,05)$  мм, длиной  $(6,4 \pm 0,05)$  мм и размещены перпендикулярно к валу под углом  $90^{\circ}$ . Ось каждой следующей лопасти должна быть повернута по отношению к оси предыдущей лопасти на угол  $90^{\circ}$  и удалена от нее на расстояние

( $3,2 \pm 0,05$ ) мм. Две средние лопасти мешалки и две крайние должны быть установлены под углом  $180^{\circ}$  друг к другу. Нижняя лопасть устанавливается с зазором в ( $1,60 \pm 0,05$ ) мм между ней и дном тигля в неподвижном положении мешалки. Верхний конец мешалки должен быть срезан на нижнем конце оси привода для подгонки к прорези (рисунок 25).

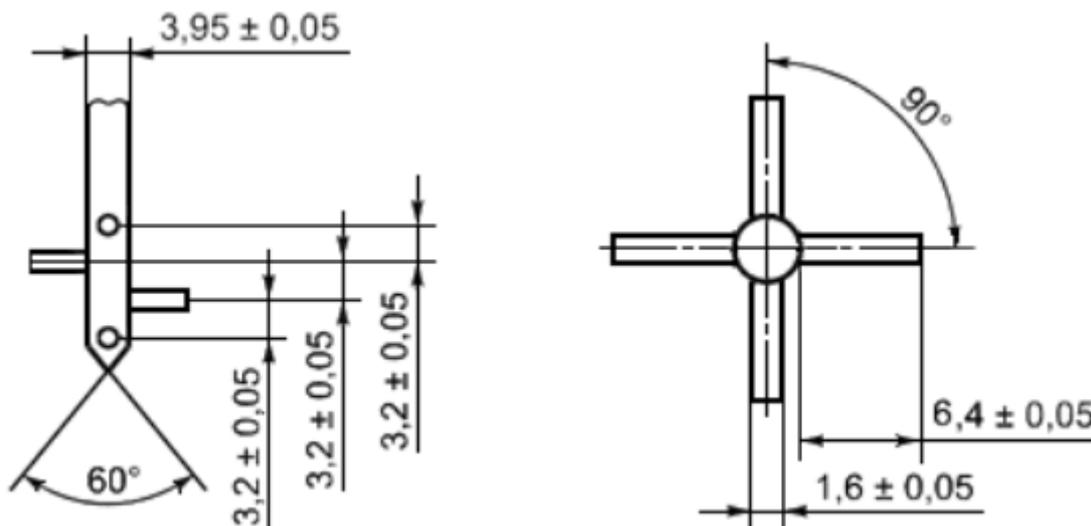
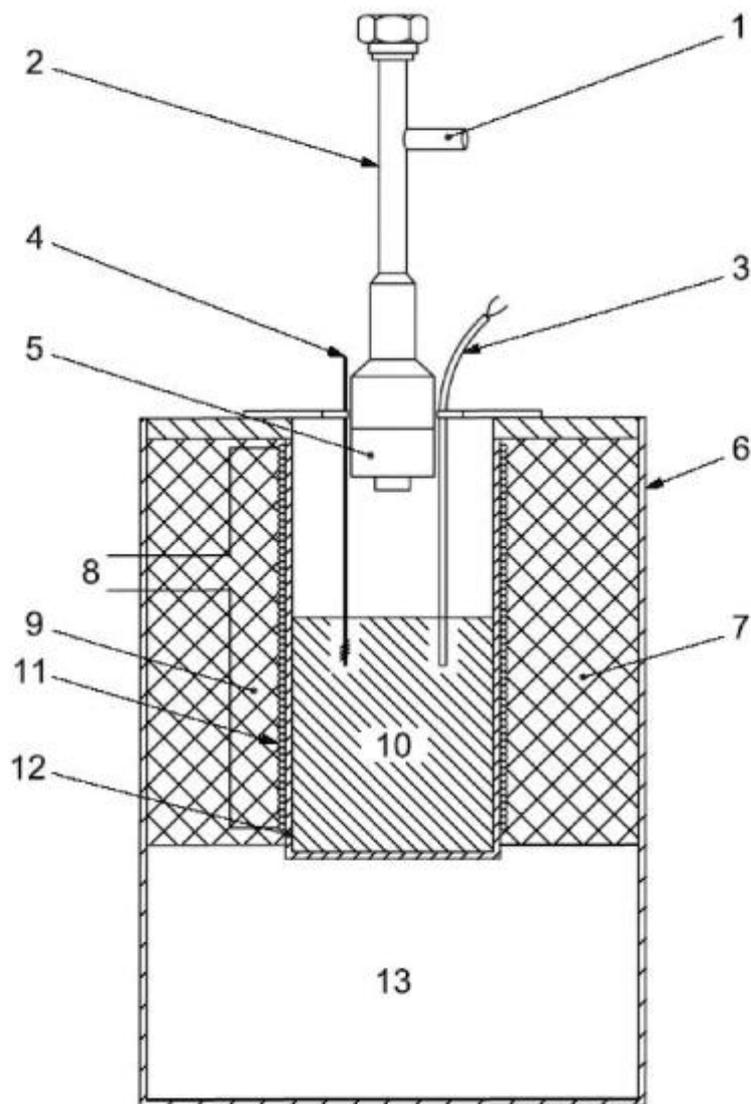


Рисунок 25 – Лопасти металлической мешалки

Печь с электрическим нагревателем и терморегулятором (рисунок 26), обеспечивающая скорость нагрева ( $3,0 \pm 0,1$ ) $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  во всем диапазоне, но не более, чем ( $3 \pm 1$ ) $^{\circ}\text{C}$  в течение любой данной минуты. Допускается контроль температуры в интервале  $300^{\circ}\text{C} - 550^{\circ}\text{C}$  по любому 5-минутному интервалу. Повышение температуры за этот интервал времени должно составлять не более ( $15 \pm 1$ ) $^{\circ}\text{C}$ .

Примерно 4 кг угля измельчают так, чтобы он прошел через сито 4,75 мм. Это составит лабораторную пробу, которая должна быть репрезентативной для проверяемой шихты или марки угля. Раскладывают лабораторную пробу на лотке и сушат до равновесного состояния с атмосферой лаборатории. Сушка не должна быть длительной, чтобы пластические свойства угля не изменились за счет его окисления. Температура сушки не должна превышать  $40^{\circ}\text{C}$ . После естественной сушки до равновесного состояния пробу делят на порции приблизительно по 500 г, от одной из которых отбирают одну четверть и измельчают последовательными шагами дробление-просеивание так, чтобы получить продукт крупностью менее 425 мкм. При этом выход класса крупности менее 212 мкм в измельченном образце не должен превышать 50 % от его массы. Полученную пробу тщательно перемешивают, предпочтительно механическим способом, и отбирают малыми порциями из разных мест не менее 5 г угля. Определение

пластических свойств проводят в двух навесках не позднее, чем через 8 ч после подготовки пробы, прошедшей через сито 425 мкм.

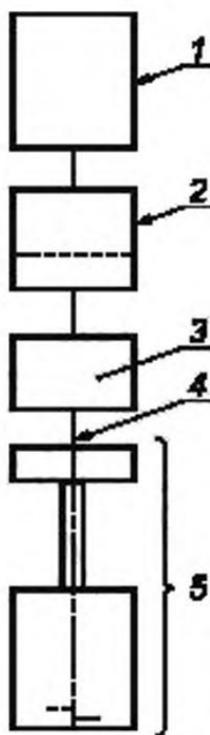


1 – трубка для выхода газа; 2 – цилиндрический кожух; 3 – чехол термопары; 4 – мешалка ванны; 5 – тигель реторты; 6 – кожух печи; 7 – теплоизоляция; 8 – выход на контроль нагрева; 9 – обмотка нагревателя; 10 – ванна с расплавом; 11 – слой изолятора (слюда); 12 – корпус ванны из низкоуглеродистой стали; 13 – блок из огнеупора  
Рисунок 26 – Схема печи и реторты

Головка пластометра, показанная схематично на рисунке 27, должна состоять из двигателя с постоянным числом оборотов (приблизительно 300-500 об/мин), соединенного непосредственно с электромагнитной муфтой или гистерезисным тормозом, способным к регулированию вращающего момента. На ведомом валу тормоза сцепления расположен барабан с делениями. Один полный

оборот барабана ( $360^\circ$ ) градуируют на 100 делений. Каждый полный оборот барабана или 100 делений хода должны быть зарегистрированы на счетчике, приводимом в действие электронным индикатором или другим подходящим методом. Как альтернативу применяют электронный прибор, способный к измерению скоростей вращения между 0,01 и 300 об/мин, который может быть присоединен к ведомому валу тормоза или к муфте. Используя электронный прибор, скорости вращения могут быть преобразованы непосредственно в величины кд/мин (*круговых делений в минуту*) и отображаться или регистрироваться на электронном приборе для считывания.

Засыпают 5 г подготовленного угля в тигель. Вращая мешалку пальцами, устанавливают ее в тигель с навеской. Затем устанавливают уплотняющую головку и обойму вместе с основанием.



1 – двигатель; 2 – муфта сцепления или тормоз; 3 – барабан с делениями или электронный сенсор; 4 – вал; 5 – реторта в сборе

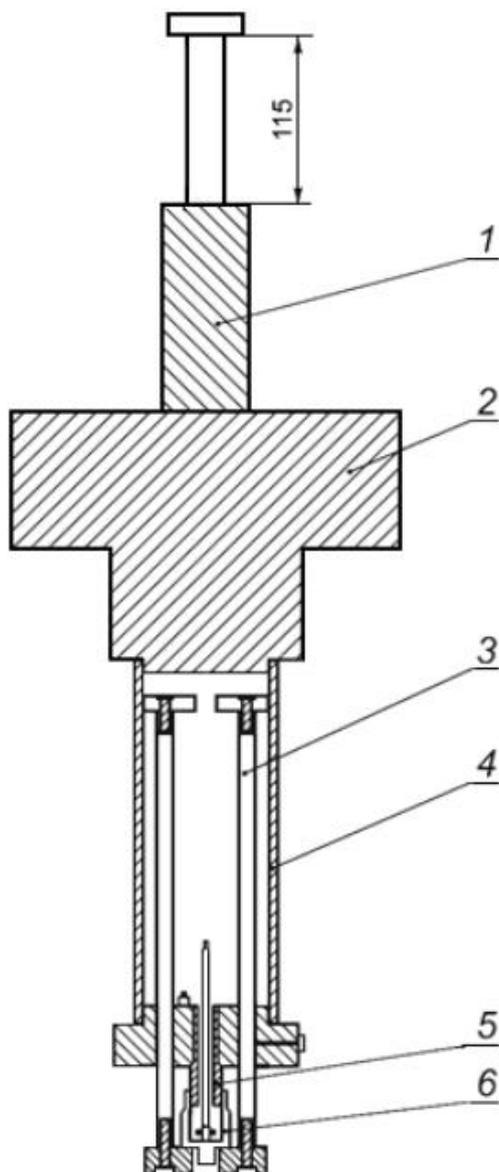
Рисунок 27 – Схематическое изображение головки пластометра

Продолжают осторожно вращать мешалку, чтобы пустоты под лопастями заполнились углем. Устанавливают статический груз на место, убедившись, что его вес полностью передается на угольную загрузку. Уплотняют загрузку падением гири 1 кг на статический груз с высоты 115 мм 12 раз с помощью специального загрузочного устройства (рисунок 27).

Собранную реторту опускают в печь так, чтобы дно тигля погрузилось в ванну с жидким припоем, нагретым до  $300^\circ\text{C}$  на глубину 75 мм. Помещают

термопару в ванну с припоем.

После восстановления исходной температуры не менее чем за 10 мин продолжают нагревать ванну со скоростью  $(3 \pm 0,1)^\circ\text{C}$  в минуту на общих основаниях.



1 – падающий груз (1 кг); 2 – статический груз (9 кг); 3 – шток скольжения; 4 – обойма; 5 – уплотняющая головка (подогнана к диаметру тигля с зазором 0,5 мм); 6 – тигель с загрузкой и мешалкой

Рисунок 28 – Типовое загрузочное устройство

При испытании отмечают температуру, при которой измерительное устройство покажет скорость вращения 1 кд/мин (круговых делений в минуту). Продолжают регистрировать температуру и скорость вращения с интервалом в

1 мин, пока вращение не прекратится. Испытания образцов угля проводят в параллелях.

В конечном счёте, в результате испытания получают следующие данные:

1. Исходная температура размягчения;
2. Максимальная температура текучести;
3. Температура затвердевания;
4. Область пластичности.
5. Максимальная текучесть (кд/мин), выраженная в виде значения десятичного логарифма.

В зарубежных математических моделях, как правило, используют показатель логарифма максимальной текучести для прогнозирования показателей механической прочности кокса.

### **3.8. Число вспучивания по ИГИ-ВУХИН**

Данный отечественный показатель (ГОСТ 32247-2013) редко определяют в коксохимических лабораториях, поэтому в открытых литературных источниках отсутствует упоминание о применении данного параметра при прогнозировании показателей качества кокса.

От общей пробы (раздел 3.2.) отбирают 20-30 г угля, доводят его до воздушно-сухого состояния и измельчают до размера частиц менее 0,2 мм таким образом, чтобы количество частиц размером 0,1 – 0,2 мм составляло не менее 40 % массы пробы. Чтобы выполнить это условие, для каждого типа угля опытным путем подбирают зазор дробилки, массу загружаемой порции и частоту просеивания через сито 0,2 мм.

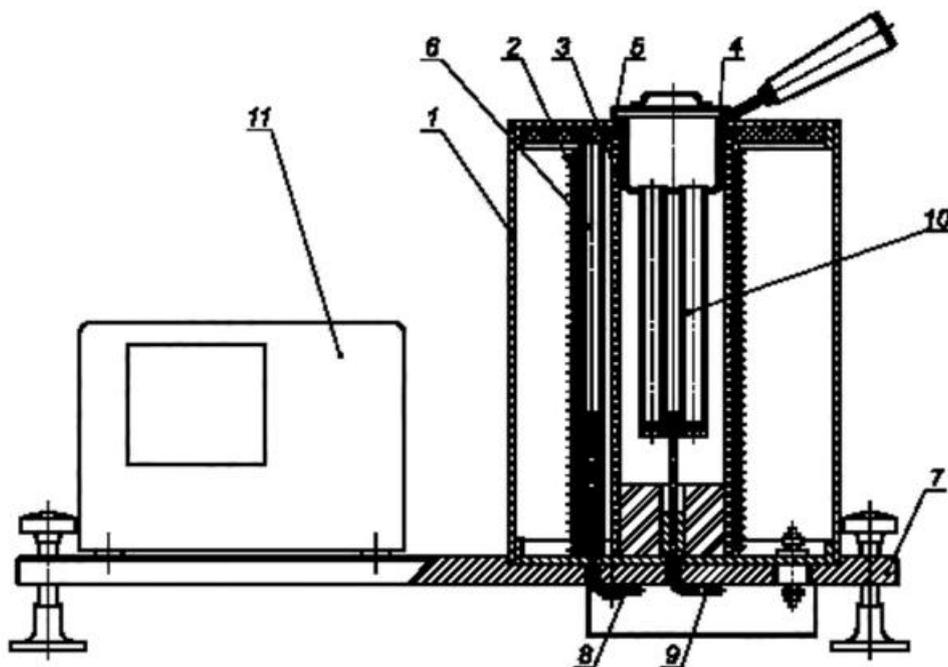
Подготовленную пробу хранят не более 3 суток. От полученной пробы угля из 2 – 3 мест отбирают две навески массой  $(1 \pm 0,01)$  г каждая. Взвешивание проводят с точностью до 0,01 г.

Если число вспучивания угля составляет не более 5 мм, то такие угли относят к слабоспекающимся и проводят повторное испытание на смеси угля с каменноугольным песком. Для этого в стеклянной пробирке готовят смесь массой  $(1 \pm 0,01)$  г, состоящую из  $(0,7 \pm 0,01)$  г угля и  $(0,3 \pm 0,01)$  г пека. Пек измельчают. Смесь тщательно перемешивают путем вращения пробирки в руках в горизонтальном положении с периодическим встряхиванием. Продолжительность перемешивания – не менее 2 мин.

Навески угля или смеси угля с пеком брикетируют одинаково. Для этого на дно тщательно очищенной трубки для испытания укладывают асбестовый кружок толщиной  $(1 \pm 0,2)$  мм и диаметром  $(12 \pm 0,1)$  мм. В трубку высыпают

навеску испытуемого образца, осторожно опускают пуансон и устанавливают в гидравлический пресс.

Испытания проводят на установке (рисунок 29), представляющей собой вертикальную трубчатую электропечь с узлом контроля и регулирования температуры.



- 1 – корпус печи; 2 – нагревательный элемент; 3 – фарфоровая труба-сердечник;  
4 – подвеска для трубок; 5 – крышка; 6 – чехол для термопары; 7 – станина;  
8 – термопара регулирующая (боковая); 9 – термопара контрольная  
(центральная); 10 – трубка для испытания угля; 11 – узел контроля и  
регулирования температуры

Рисунок 29 – Печь для испытания на вспучивание

Электропечь состоит из фарфоровой трубы-сердечника с нагревательным элементом, корпуса и крышки. Несущим элементом печи является корпус, состоящий из цилиндрического кожуха, верхнего диска и дна. Фарфоровая труба-сердечник имеет следующие размеры: длина – 280 мм, наружный диаметр – 80 мм, внутренний диаметр – 70 мм. Трубу устанавливают на дно печи, представляющее собой стальной диск толщиной 3 мм с двумя отверстиями, через которые проходят чехлы со штуцерами для установки боковой и центральной термопар. Цилиндрическая часть кожуха изготовлена из нержавеющей стали (наружный диаметр – 215 мм, высота – 300 мм). Верхний диск корпуса имеет в центре отверстие, диаметр которого соответствует наружному диаметру фарфоровой трубы. Рабочее пространство печи во время испытания закрывается крышкой.

К фарфоровой трубе по всей длине примыкает фарфоровый чехол для термопреобразователя, измеряющего температуру нагревательного элемента (боковой термопары).

Термопреобразователь для контроля температуры нагревательного элемента (боковая термопара) монтируется в специальный фарфоровый чехол, представляющий собой трубку наружным диаметром 6 мм, внутренним диаметром 4 мм и длиной 190 мм.

Перед началом испытания печь закрывают заглушкой и разогревают до температуры  $(580 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ . Рекомендуемое время разогрева печи – 80 мин. По достижении заданной температуры снимают заглушку, прикрывающую верхнее отверстие печи, и в печь опускают подвеску с четырьмя пустыми трубками. Печь закрывают крышкой. При этом температура в рабочем пространстве печи не должна опускаться ниже  $350^{\circ}\text{C}$ . Трубки выдерживают в печи 15 мин. За этот период температура рабочего пространства печи должна подняться до  $(550 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , после чего подвеску с трубками извлекают. Печь вновь закрывают заглушкой и выдерживают 15 мин в течение которых температура должна достигнуть  $(580 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ . Если указанный выше температурный режим не выдерживается, то устанавливают причину и после ее устранения вновь проводят проверку.

После достижения требуемого температурного режима приступают к проведению определений. В подвеску помещают четыре трубки с подготовленными в них брикетами (две испытуемые пробы в двух навесках каждая). Предварительно специальной линейкой в каждой трубке измеряют расстояние от верхнего края трубки до брикета. Подвеску с трубками опускают в печь и закрывают ее крышкой. По истечении 15 мин крышку снимают, подвеску с трубками извлекают из печи, печь закрывают заглушкой и выдерживают  $(15 \pm 1)$  мин. Если за это время температура в печи достигнет  $(580 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , определение считают достоверным. Трубки из подвески охлаждают до комнатной температуры и специальной линейкой измеряют расстояние от верхнего края трубки до брикета. После восстановления температуры в печи  $(580 \pm 10)^{\circ}\text{C}$  испытания повторяют с новыми пробами. Испытания проводят параллельно на двух навесках.

Число вспучивания  $V_{сп}$  вычисляют по разности высоты угольного брикета до и после нагревания (мм). За результат определения принимают среднearифметическое значение результатов двух параллельных определений одной пробы угля, округленное до целого числа.

Число вспучивания слабоспекающихся углей записывают дробью, где числитель – число вспучивания угля без пека, а знаменатель – число вспучива-

ния смеси угля с пеком. Например; число вспучивания угля без пека – 3 мм, число вспучивания угля с пеком – 18 мм.

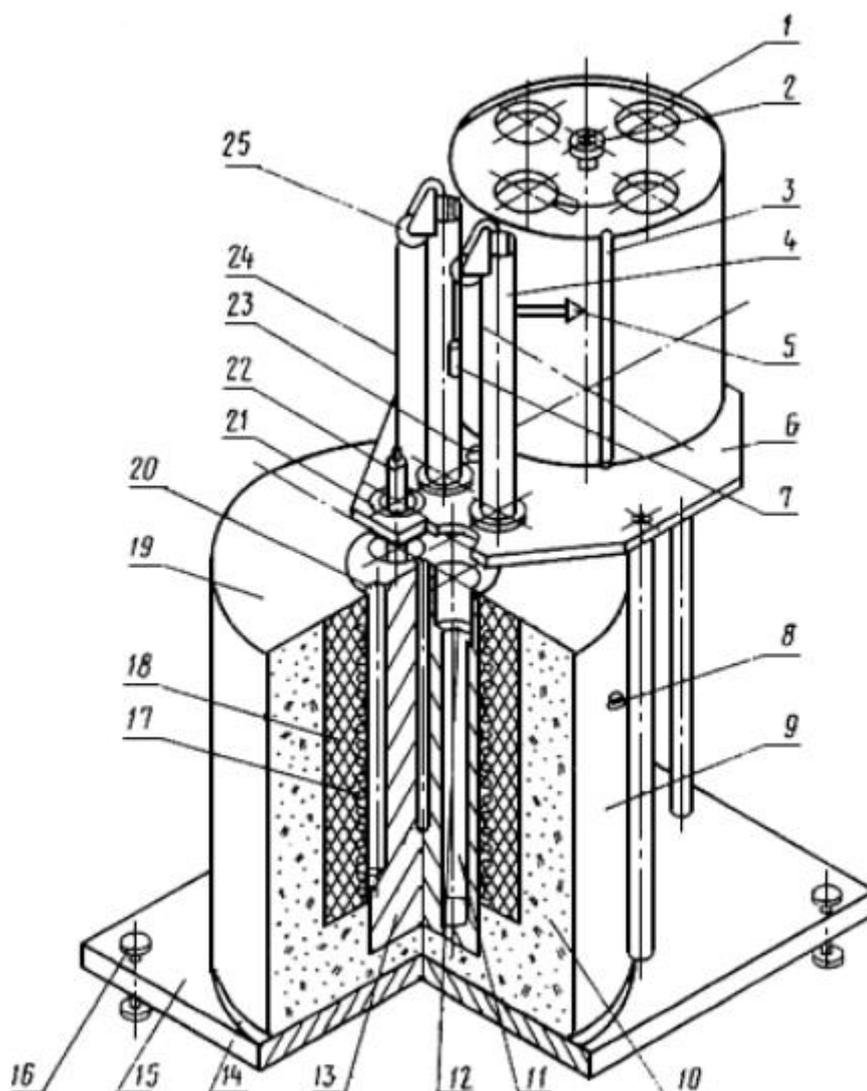
$$\text{Всп} = 3/18$$

### **3.9. Метод определения дилатометрических свойств ИГИ-ДМетИ**

Данный метод (ГОСТ 14056-77) является развитием метода испытания ИГИ-ВУХИН с элементами испытания в аппарате Сапожникова (пункты 3.5. и 3.8.).

Метод предполагает определение дилатометрических показателей в приборе ИГИ-ДМетИ (рисунок 30): индекса вспучивания  $I_{\text{В}}$ , периода нагрева до начала вспучивания  $\Pi_{\text{И}}$  и периода вспучивания  $\Pi_{\text{В}}$ . Сущность метода заключается в нагреве 2 г спрессованного угля и определении начала, продолжительности и величины вспучивания угольного брикета в условиях свободного расширения в трубке.

По достижении заданной температуры испытания устанавливают на миллиметровой бумаге перья (или регистрируют с помощью цифровых датчиков), сразу же в оба гнезда печи одновременно опускают трубки с испытуемыми пробами и включают барабан. После опускания трубок на поверхность угольных брикетов лабораторными щипцами поочередно устанавливают штемпели (диаметр головки штемпера 11,5 мм). В процессе испытания вследствие вспучивания угля объем его увеличивается, штемпель поднимается и на миллиметровой бумаге автоматически записывается кривая динамики вспучивания угля в пластическом состоянии.



1 – барабан; 2 – гайка для крепления барабана; 3 – зажим для бумаги;  
 4 – направляющая трубка; 5 – перо; 6 – плита; 7 – груз; 8 – клемма; 9 – корпус  
 печи; 10 – теплоизоляция; 11 – трубка для загрузки угля; 12 – контрольное  
 ограничительное кольцо; 13 – нагревательный блок; 14 – дно печи; 15 – плита;  
 16 – установочный винт; 17 – спираль из нихрома; 18 – керамика для спирали;  
 19 – крышка печи; 20 – отверстие для термопар; 21 – держатель трубки;  
 22 – штампель; 23 – уровень; 24 – нить; 25 – блок

Рисунок 30 – Установка ИГИ-ДМетИ для определения  
 дилатометрических свойств

При испытании некоторых сильно вспучивающихся углей пластическая масса может не поместиться в трубке длиной 117 мм. В этом случае испытание повторяют в трубках длиной 140 мм, предварительно заменив в dilatометре держатели трубок высотой 45 мм на держатели высотой 22 мм. Угли марок Г,

Ж, К и шихты испытывают при температуре 470°C, марки ОС – при 600°C, а марки Т – при 800°C. Испытание считают законченным, когда после снижения кривой вычерчивается прямая линия.

После окончания испытания отводят перья от миллиметровой бумаги и поднимают их выше барабана, затем вынимают штемпели и извлекают трубки вместе с держателями. После извлечения трубок держатели ставят обратно в гнезда. Шляпку штемпеля тщательно зачищают наждачной бумагой. В гнезда блока помещают две новые трубки с приготовленными угольными брикетами и проводят следующее испытание.

После проведения дилатометрического испытания на миллиметровой бумаге или программными средствами на компьютере получают кривую (рисунок 31).

### Первоначальный вид дилатометрической кривой (до обработки)



### Вид обработанной кривой (первоначальная кривая повернута на 180°)

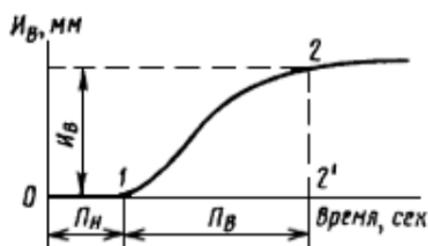


Рисунок 31 – Типовой вид кривой при испытании

На дилатометрической кривой находят точки начала и конца вспучивания.

Проекции точек начала и конца вспучивания на ось абсцисс делят отрезок, представляющий собой общее время нагрева угля от начала опыта до конца вспучивания, на две части: 0-1 период нагрева угля от начала вспучивания, обозначаемый  $P_H$ ; 1-2' – период вспучивания, обозначаемый  $P_B$ . Величина ординаты в миллиметрах, соответствующая отрезку 2-2', представляет собой приращение высоты брикета за весь период вспучивания и обозначается индексом

$I_B$ , с обязательным указанием температуры проведения испытания (рисунок 31).

Для вычисления показателей  $P_{и}$  и  $P_B$  в секундах пользуются вспомогательной таблицей.

Показатели  $P_{и}$ ,  $P_B$  и  $I_B$  являются результатом проведения испытания.

### **3.10 Определение выхода жидкоподвижных продуктов из пластической массы угля**

Одним из уникальных методов испытания угля, предложенных отечественными учёными, является методика ГОСТ 17621-89 по определению выхода жидкоподвижных продуктов из пластической массы угля.

Методика проведения испытания имеет следующий порядок. Высушенную до воздушно-сухого состояния лабораторную пробу угля крупностью 0-3 мм рассеивают на ситах с размером отверстий 1 и 3 мм. Полученный уголь классов 1-3 мм и 0-1 мм взвешивают в отдельности и устанавливают их массовую долю в пробе. Зольность пробы угля не должна превышать 10%. При зольности угля более 10% пробу обогащают по ГОСТ 1186.

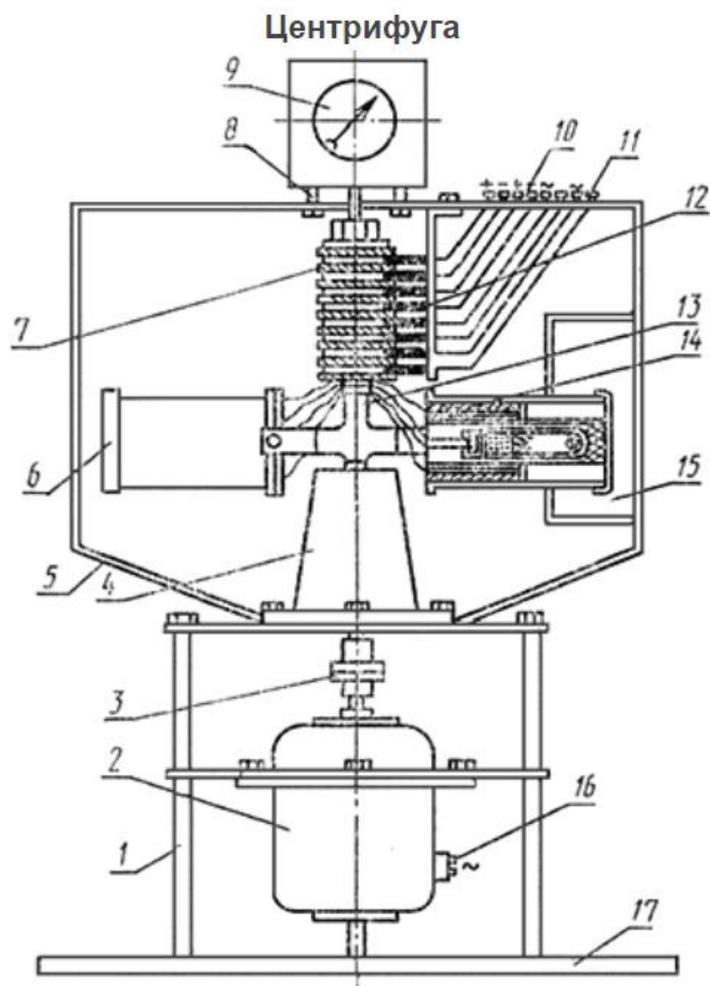
Для определения выхода продуктов термической деструкции берут навеску угля массой 6 г, состоящую из двух отдельных частей – класса 1-3 мм и 0-1 мм, взятых пропорционально массовой доле этих классов в исходной воздушно-сухой пробе угля. Взвешивания производят с точностью до второго десятичного знака, то есть на технических весах.

Собирают установку по схеме, показанной на рисунках 32 и 33. Перед началом работы проверяют крепления центрифуги. После этого балансируют центрифугу, добавляя балласт в резервную печь, чтобы вращение ее не вызвало вибрации приборов и стука.

Проводят загрузку патрона (рисунок 34). Для этого в нижнюю часть его помещают взвешенный приемник жидкоподвижных продуктов. Затем нижнее отверстие патрона закрывают резиновой пробкой и проверяют его на герметичность. Нижнюю часть патрона опускают в воду и в верхнее его отверстие вдуют воздух.

На приемник жидкой фазы ставят вкладыш, снабженный фильтрующей сеткой. Затем на фильтрующую сетку послойно загружают навеску угля массой 6 г. Сначала на сетку загружают уголь класса 1-3 мм, а сверху его насыпают уголь класса 0-1 мм. На угольную загрузку кладут кружок фильтровальной бумаги, который накрывают листовым асбестом.

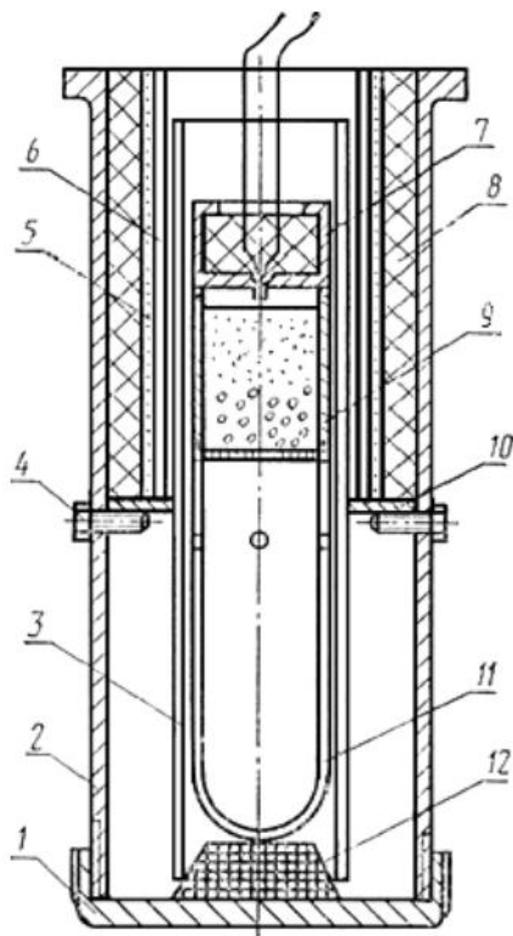
Подготовленный патрон помещают в трубчатую электрическую печь через ее донное отверстие, завинчивают дно печи, на вкладыш помещают термопару и закрывают дверцу кожуха центрифуги (рисунок 32 и 33).



1 – крепежная стойка; 2 – электродвигатель; 3 – муфта; 4 – корпус подшипников; 5 – кожух центрифуги; 6 – резервная электропечь; 7 – токосъемник; 8 – крепление тахометра; 9 – тахометр; 10 – контакты термопары; 11 – подвод электрического тока к электропечи; 12 – скользящие контакты; 13 – держатели печи; 14 – электропечь; 15 – дверцы; 16 – контакты электродвигателя; 17 – опорная плита

Рисунок 32 – Установка для определения выхода жидкоподвижных продуктов из пластической массы угля

### Печь трубчатая



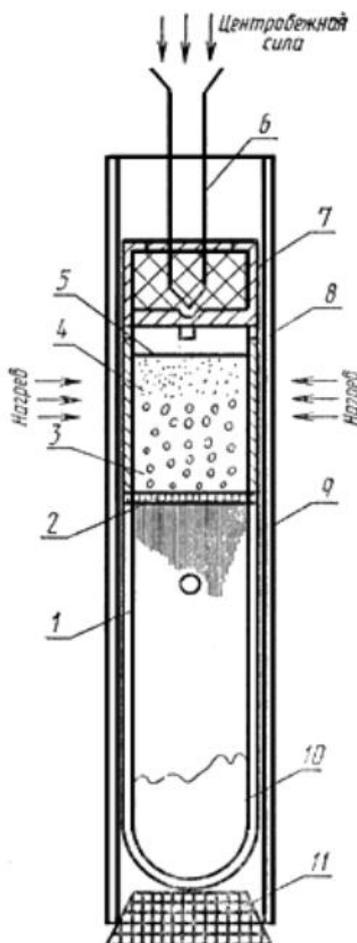
1 – крышка печи; 2 – корпус печи; 3 – загрузочный патрон; 4 – винт; 5 – электроспираль; 6 – изоляционная трубка; 7 – термопара; 8 – изоляционная масса; 9 – вкладыш; 10 – опорное кольцо; 11 – приемник; 12 – пробка

Рисунок 33 – Трубчатая печь, устанавливаемая в центрифугу

Включают нагрев печи. Через 1-2 мин включают центрифугу и плавно увеличивают число ее оборотов до 1500 оборотов в минуту. Следят за скоростью повышения температуры, регулируя ее таким образом, чтобы температура угольной массы достигла  $300^{\circ}\text{C}$  в течение 5 мин. В интервале температур от  $300$  до  $600^{\circ}\text{C}$  скорость нагрева навески угля должна составлять  $(70 \pm 5)^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . При достижении температуры  $550^{\circ}\text{C}$  электропечь выключают, при этом температура повышается до  $600^{\circ}\text{C}$  за счет тепловой энергии. Через 12 мин, считая от начала опыта, центрифугу выключают и после полной ее остановки открывают дверцу кожуха. Отвинчивают дно печи, извлекают загрузочный патрон, снимают резиновую пробку, осторожно выталкивают приемник с жидкоподвижными

продуктами и вкладыш с твердым остатком, которые затем помещают в эксикатор для охлаждения.

### Загрузочный патрон



- 1 – приемник; 2 – фильтр-сетка; 3 – угольная загрузка класса 1-3 мм;  
4 – угольная загрузка класса 0-1 мм; 5 – асбестовая прокладка; 6 – термопара;  
7 – чехол термопары; 8 – вкладыш; 9 – загрузочный патрон;  
10 – жидкоподвижные продукты; 11 – пробка

Рисунок 34 – Действие центробежных сил на пробу угля в загрузочном патроне

Жидкоподвижные продукты взвешивают вместе с приемником. Подтеки жидкоподвижных продуктов, прошедшие через сетку, но оставшиеся на ее внешней стороне, отделяют от сетки и взвешивают вместе с жидкоподвижными продуктами. Твердый остаток отделяют от вкладыша и асбестовой прокладки, помещают на кальку и тоже взвешивают. Выход парогазовой фазы определяют по разности между массой исходной навески угля и суммой масс жидкоподвижных продуктов и твердого остатка. Все взвешивания производят с точностью до второго десятичного знака. Определение выхода продуктов деструкции угля производят параллельно в двух навесках.

Выход жидкоподвижных продуктов и твердого остатка в процентах вычисляют по формуле:

$$X(X_1) = \frac{m * 100}{m_1}$$

где  $m$  – масса жидкоподвижных продуктов или твёрдого остатка, г;

$m_1$  – масса исходной воздушно-сухой навески угля, г;

Выход парогазовой фазы  $X_2$  в процентах вычисляют по формуле:

$$X_2 = 100 - (X + X_1)$$

Выход жидкоподвижных продуктов  $X^\Gamma$ , твёрдого остатка  $X_1^\Gamma$  и парогазовой фазы  $X_2^\Gamma$  в пересчёте на горючую массу угля (раздел 3.3.) в процентах вычисляют по формулам:

$$X^\Gamma = \frac{(100 - A_X^a) * X}{100 - (W^a + A^a)}$$

$$X_1^\Gamma = 100 - (X + X_2)$$

$$X_2^\Gamma = \frac{(X_2 - W^a) * 100}{100 - (W^a + A^a)}$$

где  $X$ ,  $X_1$  – выход жидкоподвижных продуктов и твёрдого остатка из воздушно-сухой навески угля, %;

$W^a$  - массовая доля влаги навески угля, %;

$A^a$  - аналитическая зольность навески угля, %;

$A_X^a$  - аналитическая зольность жидкоподвижных продуктов, %.

Стандарт допускает ускоренный расчёт выхода жидкоподвижных продуктов на горючую массу угля по формуле:

$$X^\Gamma = \frac{97 * X}{100 - (W^a + A^a)}$$

где 97 – число, получаемое при вычитании из 100 значения зольности жидкоподвижных продуктов, равного 3%;

$X$  – выход жидкоподвижных продуктов из воздушно-сухой навески угля, %;

$W^a$  – массовая доля влаги навески угля, %;

$A^a$  – аналитическая зольность навески угля, %.

### 3.11. Размолоспособность по Хардгроу

При переходе угля в пластическое состояние и распирании важным фактором может оказаться твёрдость исходных частиц, так как процесс спекания на первых стадиях можно представить как взаимное проникновение частиц угля друг в друга на небольшую глубину. Для оценки твёрдости частиц угля можно использовать такой гостированный параметр, как размолоспособность по Хардгроу (ГОСТ 15489.2-2018).

Для проведения испытания данным методом используют аппарат Хардгроу, изображенный на рисунке 35. В состав аппарата входит неподвижная размольная чаша (рисунок 35-36) из закаленной стали с кольцевым горизонтальным углублением на дне, в котором находятся восемь отполированных стальных шариков диаметром  $(25.40 \pm 0.13)$  мм.

Шарики приводятся в движение верхним нажимным кольцом, которое вращается со скоростью  $(20 \pm 1)$  об/мин. Нажимное кольцо в свою очередь приводится в движение посредством вертикального вала с помощью электрического мотора через понижающую передачу или, в современных моделях, через ременную передачу. На вертикальный вал накладывают дополнительные грузы, чтобы общая вертикальная сила, давящая на шарики и складывающаяся из веса грузов, вала, верхнего нажимного кольца и передаточного механизма, составляла  $(29,0 \pm 0.2)$  кг. Аппарат оборудован счетчиком оборотов и автоматическим устройством, которое регулируют таким образом, чтобы останавливать работу аппарата через  $(60 \pm 0.25)$  оборотов вала.

Воздушно-сухую пробу по частям (порциями не более 250 г) подвергают рассеву с помощью машины для механического отсева. Продолжительность отсева каждой порции составляет  $2 \text{ мин} \pm 10 \text{ с}$ . Используют набор сит, состоящий из верхнего сита с отверстиями 1,18 мм (1.25 мм) и нижнего сита с отверстиями 0,60 мм (0.63 мм), а также крышки и поддона.

Весь материал крупностью более 1,18 мм (1.25 мм), оставшийся на верхнем сите после отсева, объединяют и дробят, настроив дробилку таким образом, чтобы она разрушала только самые крупные частицы. После дробления весь материал порциями не более 250 г каждая подвергают рассеву с помощью машины для механического отсева, продолжая сев каждой порции в течение  $2 \text{ мин} \pm 10 \text{ с}$ . Материал крупностью более 1,18 мм (1,25 мм) снова объединяют, дробят.

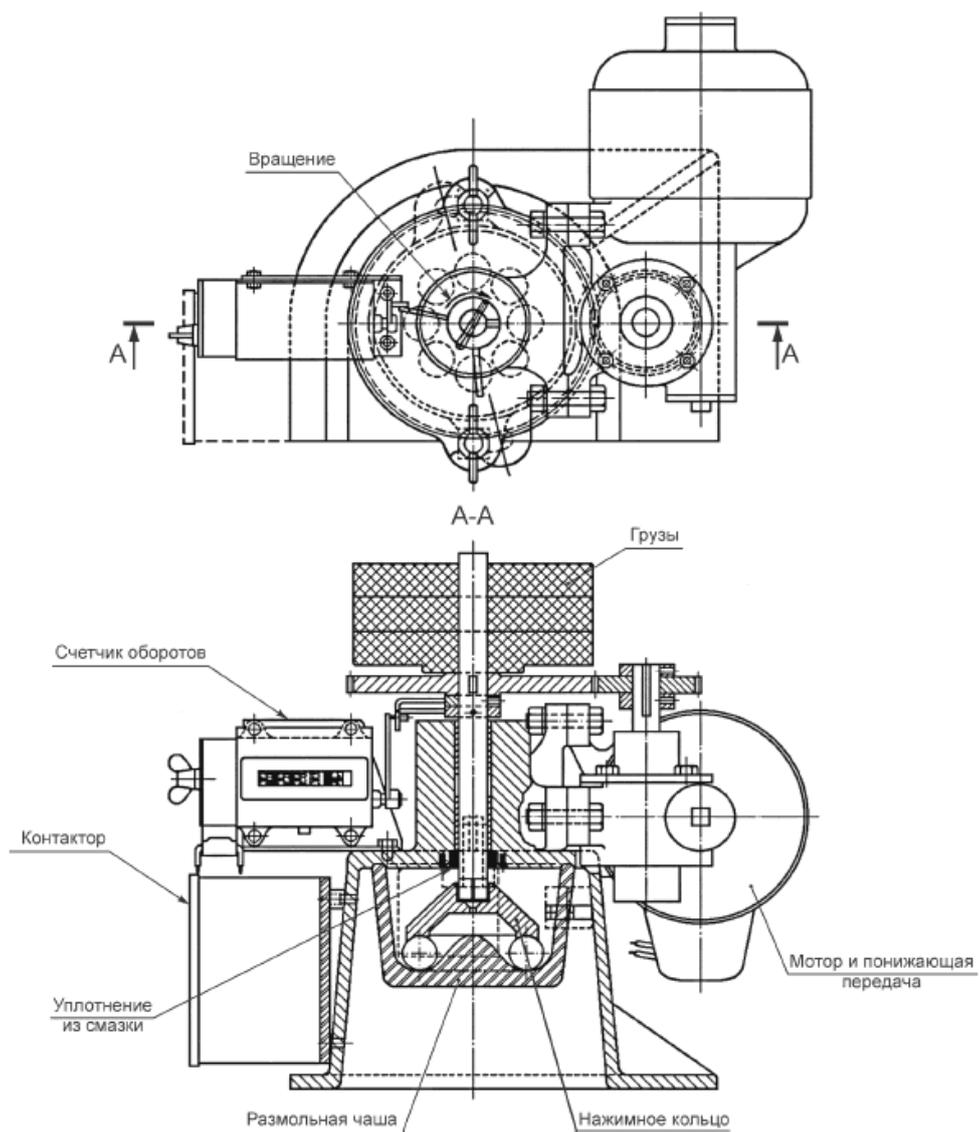


Рисунок 35 – Аппарат Хардгрова

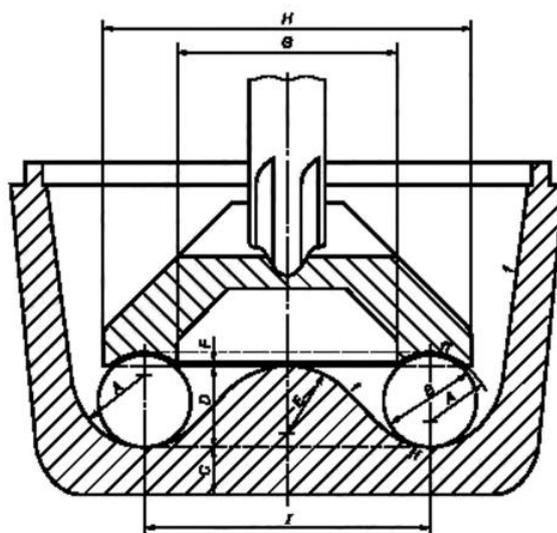


Рисунок 36 – Размалывающий узел

Весь материал пробы, оставшийся на сите с отверстиями 0,60 мм (0,63 мм), собранный в процессе дробления и отсева (далее – проба для испытания), имеющий размер частиц от 1,18 мм (1,25 мм) до 0,60 мм (0,63 мм), хорошо перемешивают и делят с целью получения порций пробы для испытания массой приблизительно  $(120 \pm 10)$  г.

Заключительным этапом в приготовлении пробы для испытания является удаление пыли из порции массой  $(120 \pm 10)$  г, для чего порцию пробы для испытания в течение  $5 \text{ мин} \pm 10 \text{ с}$  просеивают на сите с размером отверстий 0,60 мм (0,63 мм) с помощью машины для механического отсева. На испытание отправляют  $(50 \pm 0,01)$  г.

В размольную чашу (рисунок 35-36) опускают верхнее нажимное кольцо, соединяют его с вертикальным валом. На верхнюю часть вала накладывают груз, масса которого рассчитана с учетом того, чтобы общая нагрузка на шарики составляла  $(29,0 \pm 0,2)$  кг. Проверяют равномерность приложения нагрузки. Настраивают счетчик оборотов и регулируют автоматическое отключающее устройство так, чтобы вращение вала прекращалось через  $(60 \pm 0,25)$  оборотов. Включают мотор аппарата Хардгрова.

После окончания измывывания на аппарате Хардгрова проводят рассев. Рассев продолжают в течение  $10 \text{ мин} \pm 10 \text{ с}$ , после чего угольную пыль с нижней поверхности сита с отверстиями 0,075 мм (0,071 мм) осторожно счищают в поддон с помощью мягкой щетки, чтобы не повредить сетку. Рассев угля и очистку нижней поверхности сита повторяют дважды, при этом продолжительность повторных отсевов составляет  $5 \text{ мин} \pm 10 \text{ с}$ .

Массу угля, прошедшего через сито с размером отверстий 0,075 мм (0,071 мм), выраженную в граммах, вычисляют по формуле

$$m = m_1 - m_2$$

где  $m_1$  – масса навески, отобранной для испытания, г;

$m_2$  – масса угля, оставшегося на сите с отверстиями 0,075 мм (0,071 мм), г.

Коэффициент размолоспособности (HGI) определяют по графику или вычисляют по уравнению регрессионной прямой (рисунок 37).

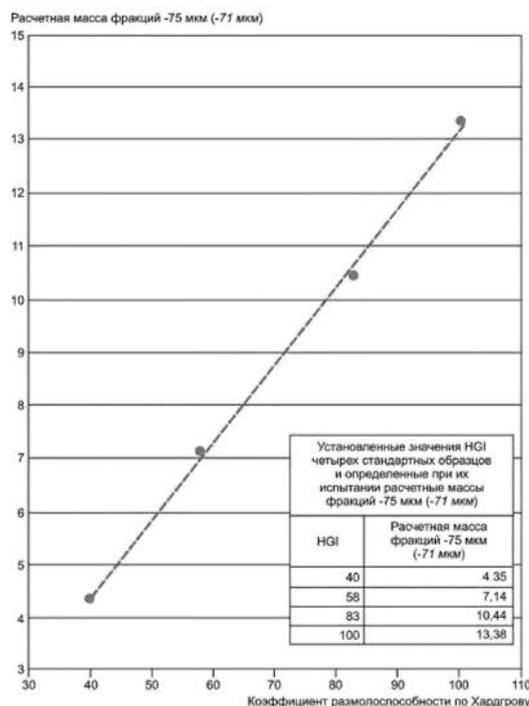


Рисунок 37 – Градуировочная кривая по Хардгроу

### 3.12. Низшая и высшая теплота сгорания

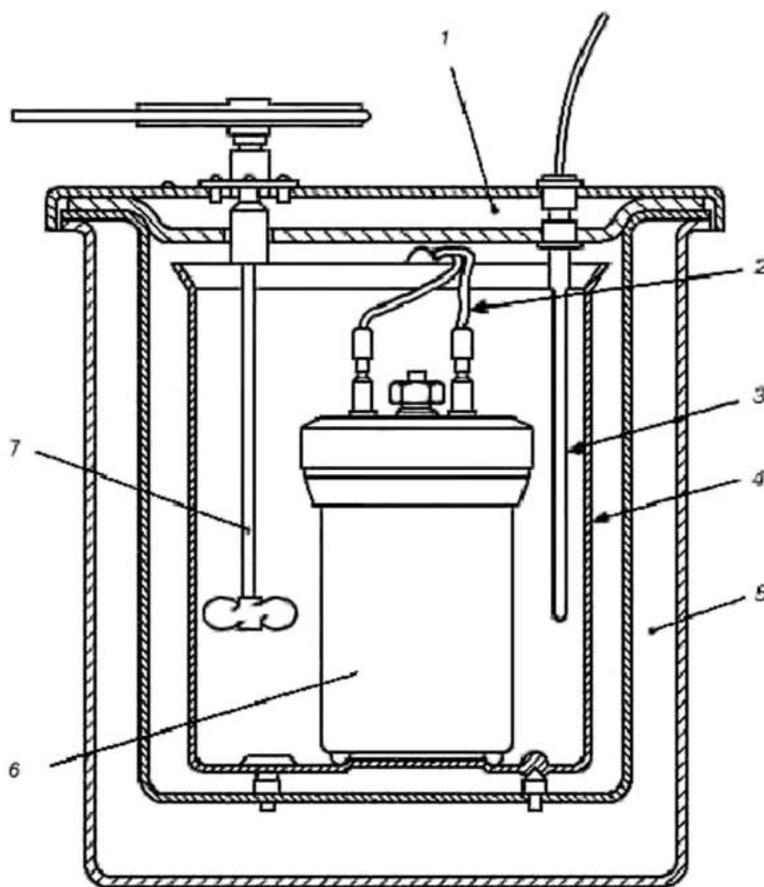
По значению теплоты сгорания можно косвенно судить об элементном составе угля (соотношение углерода, водорода и других элементов) и строении органической массы угля. Данные показатели практически не использовали для прогнозирования механических показателей качества кокса. На наш взгляд, это связано с трудоёмкостью определения данных параметров. Поэтому применение данного показателя при прогнозировании показателей качества остаётся открытым вопросом.

Определение высшей теплоты сгорания топлива (ГОСТ 147-2013) методом сжигания в калориметрической бомбе (рисунок 38) состоит из двух отдельных процедур:

1. сжигание стандартного вещества (эталонной бензойной кислоты) для определения энергетического эквивалента калориметра (режим градуировки);
2. сжигание навески топлива (рабочий режим).

Оба определения должны проводиться в одинаковых, установленных условиях, на одной и той же аппаратуре, с одинаковыми реактивами и материалами. Выполнение этого требования позволяет исключить систематические ошибки, связанные с неконтролируемыми потерями тепла в калориметрической системе, которые не могут быть учтены в величине исправленного подъема температуры.

Сущность калориметрической процедуры состоит в количественной оценке изменения температуры воды в калориметрическом сосуде (подъема температуры), которое происходит исключительно в результате реакции сгорания навески в калориметрической бомбе в атмосфере сжатого кислорода. Для адиабатических калориметров изменение температуры воды в калориметрическом сосуде соответствует измеренному (наблюдаемому) подъему температуры, причем за начальную температуру воды принимают температуру в момент зажигания пробы, а за конечную – температуру в момент, когда она выравнивается во всей системе, и скорость изменения температуры в сосуде становится не более 0,001 К/мин.



- 1 – крышка термостата; 2 – контактные провода цепи зажигания;  
 3 – измеритель температуры; 4 – калориметрический сосуд;  
 5 – термостат; 6 – калориметрическая бомба; 7 – мешалка

Рисунок 38 – Калориметр классического типа с термостатом и бомбой для сжигания

В изопериболических (реальных) калориметрах изменение температуры воды в калориметрическом сосуде, происходящее в результате сжигания пробы в бомбе, нельзя оценивать по измеренному подъему температуры, так как одновременно с нагревом воды в калориметрическом сосуде за счет тепла от

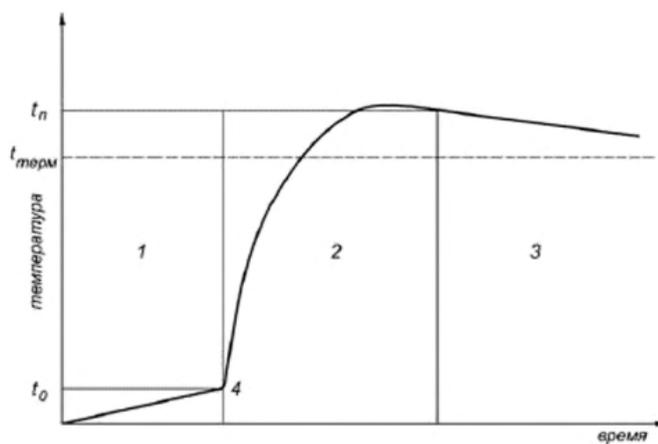
сгоревшей пробы происходит теплообмен между сосудом и окружающей средой (термостатом).

Поэтому при работе на изопериболических калориметрах для расчета теплоты сгорания пробы используют исправленный подъем температуры – величину, полученную путем введения поправки на теплообмен в измеренную величину подъема температуры. Определение такой поправки является важной частью калориметрического опыта.

При изотермическом режиме температура воды в термостате калориметра в течение испытания поддерживается постоянной с помощью активного управления. Теплообмен между калориметрическим сосудом и термостатом происходит через общие границы. Чтобы оценить фактический теплообмен следует учитывать, что поток тепла между сосудом и термостатом прямо пропорционален действующей разнице температур (тепловому напору) между ними для достаточно большого диапазона теплового напора. Хорошая калориметрическая практика состоит в том, чтобы в конце опыта температура в термостате и конечная температура в сосуде были близки.

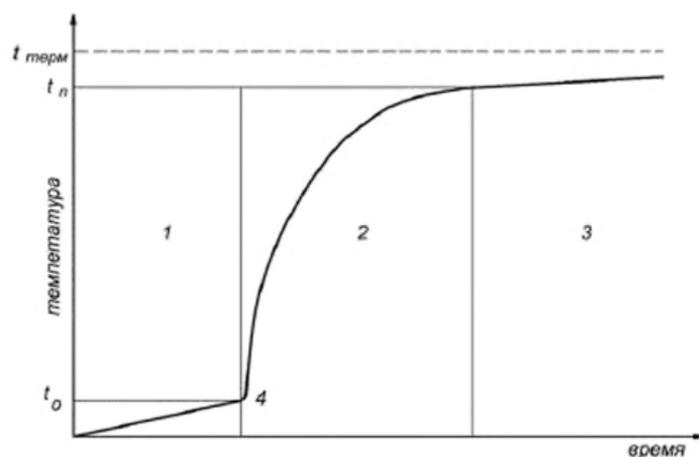
Возможны два варианта температурного профиля калориметрического испытания:

- 1) температура в термостате несколько ниже, чем конечная температура в калориметрическом сосуде (рисунок 39);
- 2) температура в термостате несколько выше, чем конечная температура в калориметрическом сосуде (рисунок 40).



- 1 – начальный период; 2 – главный период; 3 – конечный период;  
4 – зажигание пробы;  $t_0$  – начальная температура главного периода;  
 $t_n$  – конечная температура главного периода;  $t_{\text{терм}}$  – температура термостата

Рисунок 39 – Первый вариант температурного профиля



1 – начальный период; 2 – главный период; 3 – конечный период;  
 4 – зажигание пробы;  $t_0$  – начальная температура главного периода;  
 $t_n$  – конечная температура главного периода;  $t_{\text{терм}}$  – температура термостата

Рисунок 40 – Второй вариант температурного профиля

При расчете исправленного подъема температуры в калориметрическом сосуде учитывают соотношение температур в термостате и сосуде: в первом варианте (рисунок 39) поправку на теплообмен между калориметрическим сосудом и термостатом (окружающей средой) прибавляют к измеренной разности температур в сосуде, а во втором (рисунок 40) – поправку вычитают. В современных автоматических изопериболических калориметрах оптимальное соотношение температур в термостате и калориметрическом сосуде заложено в программу прибора.

Калориметрический опыт начинают после того, как происходит выравнивание температур всех частей калориметра, т. е. когда скорость изменения температуры в калориметрическом сосуде станет меньше 0,001 К/мин. Калориметрический опыт в приборе с изотермическим термостатом разделяется на три периода:

1) *начальный* – предшествует сжиганию навески и служит для учета теплообмена калориметрической системы с окружающей средой в условиях начальной температуры опыта;

2) *главный* – это сгорание навески и сопутствующих веществ, передача выделившейся теплоты калориметрической системе и выравнивание температуры всех частей калориметра;

3) *конечный* – служит для учета теплообмена калориметрической системы с окружающей средой в условиях конечной температуры опыта.

Скорость изменения температуры в начальном и конечном периодах характеризует интенсивность и направленность теплообмена в системе.

Включают мешалку, которая должна работать с постоянной скоростью в течение всего испытания. Для выравнивания температуры всех частей калориметра необходимо перемешивать воду в сосуде не менее 10 мин. Когда достигается устойчивое состояние системы, запускают отсчёт начального периода, при котором скорость изменения температуры в калориметрическом сосуде становится постоянной. Среднее отклонение скорости изменения температуры не должно превышать 0,001 К/мин. Продолжительность начального периода составляет 5 мин (6 замеров температуры). Последнее значение температуры начального периода является исходной температурой главного периода. Данные записывают в рабочий журнал.

В конце начального периода, когда установлена исходная температура главного периода, включают зажигание. Обычно ток автоматически прерывается, так как запальная проволока начинает гореть или плавиться. Электрическая энергия, необходимая для зажигания, настолько мала, что ее не учитывают в дальнейших расчетах.

Первый отсчет температуры в главном периоде проводят через 30 с после последнего отсчета в начальном периоде. Продолжают снимать показания термометра через каждые 30 с. Главный период считают законченным с наступлением равномерного изменения температуры.

Конечный период начинается, когда происходит выравнивание температуры всех частей калориметра после сжигания пробы, т. е. когда калориметрическая система достигает нового устойчивого состояния в отношении скорости изменения температуры. Последний отсчет температуры главного периода является начальным отсчетом конечного периода, в котором снимают 10-14 показаний с интервалом 30 с.

По окончании измерений вынимают калориметрический сосуд из термостата, затем из сосуда вынимают бомбу. Осторожно открывают выпускной клапан на крышке бомбы, выпускают газ и разбирают бомбу. Собирают остатки запальной проволоки и взвешивают на аналитических весах. Тщательно исследуют внутреннюю поверхность бомбы, тигель и твердый остаток на дне бомбы. Если при осмотре обнаруживают признаки неполного сгорания (сажу или частицы несгоревшего топлива), то полученные результаты считают недействительными, а испытание повторяют.

Далее производят вычисления. Ниже указаны основополагающие формулы без описания специальных поправок и пересчётов на различное состояние. Детальный расчёт можно найти непосредственно в ГОСТ 147-2013.

Сначала рассчитывают энергетический эквивалент калориметра  $C$ , Дж/К по данным испытания бензойной кислоты:

$$C = \frac{Q_1^6 + Q_2^6 + Q_N}{\Delta t_6}$$

где  $Q_1^6$  – количество теплоты, выделившейся при сгорании навески бензойной кислоты;

$Q_2^6$  – количество теплоты, выделившейся при сгорании запальной проволоки, Дж, рассчитывают по формуле;

$Q_N$  – количество теплоты, выделившейся при образовании и растворении в воде азотной кислоты, Дж;

$\Delta t_i$  – градиент температуры при испытании в калориметре бензойной кислоты (разница  $t_{\text{терм}} - t_0$ ) с учётом поправки на изопериболичность калориметра  $t_{\text{терм}} \neq t_{\text{п}}$  (рисунок 39-40).

$Q_1$  и  $Q_2$  рассчитывают по формуле типа:

$$Q = qm$$

где  $q$  – удельное количество тепла (значения известны для бензойной кислоты и запальной проволоки), Дж/кг;

$m$  – масса бензойной кислоты или запальной проволоки, кг.

$Q_N$  рассчитывается по специальной эмпирической формуле, указанной в стандарте.

Далее рассчитывают теплоту сгорания аналитической пробы топлива, определенную в калориметрической бомбе, выраженную в кДж/кг, рассчитывают по формуле:

$$Q_b^a = \frac{C\Delta t - Q_1 - Q_2 - Q_3}{m}$$

где  $\Delta t$  – исправленный подъем температуры в калориметрическом сосуде, К;

$Q_1$  – количество теплоты, выделившейся при сгорании запальной проволоки, кДж;

$Q_2$  – количество теплоты, выделившейся при сгорании хлопчатобумажной нити, кДж;

$Q_3$  – количество теплоты, выделившейся при сгорании вспомогательного вещества (бензойная кислота, н-додекан, образцы углей или коксов, спектрально чистый графит), кДж.

$m$  – масса навески (может варьироваться от 0,8 до 1,5 г), г.

Высшую теплоту сгорания аналитической пробы топлива при постоянном объеме,  $Q_S^a$ , выраженную в кДж/кг, рассчитывают по формуле

$$Q_S^a = Q_b^a - (Q_S + Q_N)$$

$Q_S$  – количество теплоты, выделившейся при образовании и растворении в воде серной кислоты (поправка на серу), рассчитывается по приводимой в стандарте эмпирической формуле, кДж/кг;

$Q_N$  – количество теплоты, выделившейся при образовании и растворении в воде азотной кислоты (поправка на азот), рассчитывается по приводимой в стандарте эмпирической формуле, кДж/кг.

Далее  $Q_S^a$  может быть пересчитана на другие состояния топлива, например,  $Q_S^{daf}$  (таблица 5), формулы пересчёта приведены в стандарте.

Низшая теплота сгорания отличается от высшей только тем, что вода, образующаяся при сгорании топлива, не конденсируется, а остается в виде пара и удаляется с дымовыми газами. Расчёт производят по эмпирической формуле на основе высшей теплоты сгорания  $Q_S^a$ :

$$Q_i^a = Q_S^a - 24,42(W^a + 8,94H^a)$$

где 24,42 – теплота парообразования при 25°C в расчете на 1% выделившейся воды, кДж/кг;

8,94 – коэффициент пересчета массовой доли водорода на воду;

$W^a$  – массовая доля влаги аналитической пробы, %;

$H^a$  – массовая доля водорода в аналитической пробе, %.

Низшую теплоту сгорания с аналитического состояния  $Q_i^a$  по формулам перевода можно пересчитать, например, на рабочее состояние  $Q_i^r$ .

### **3.13. Химический анализ золы. Каталитическая активность золы угля при газификации**

Золу угля (раздел 3.3.) можно подвергнуть количественному химическому анализу и установить её оксидный состав. Оксиды металлов, особенно щелочных металлов, доказанно оказывают каталитическое действие, то есть ускоряют протекание химической реакции при химическом взаимодействии кокса с  $CO_2$  (определение показателей  $CRI$  и  $CSR$ , раздел 2.6.). Некоторые исследователи указывают на важность химического состава золы и её каталитических свойств при прогнозировании показателей  $CRI$  и  $CSR$ . По этой причине предложены различные коэффициенты, которые отражают химический состав золы угля, соотношение каталитически активных оксидов к неактивным:

$$BI = \frac{Na_2O + K_2O + CaO + MgO + Fe_2O_3}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

$$MBI = \frac{100A^d(Na_2O + K_2O + CaO + MgO + Fe_2O_3)}{(100 - V^{daf})(SiO_2 + Al_2O_3)}$$

где  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$  ... – процентное содержание соответствующего оксида.  
 $A^d$ ,  $V^{daf}$  – см. разделы 3.3. и 3.4.

Приоритет в разработке подобных коэффициентов принадлежит зарубежным исследователям. Коэффициенты  $BI$ ,  $MBI$  и различные их варианты включают в математические модели для прогнозирования показателей качества кокса  $CRI$  и  $CSR$ .

Химический анализ и идентификацию компонентов золы возможно определить с помощью гравиметрических и титриметрических методов по ГОСТ 10538-87. Для количественного химического анализа также возможно использовать современные физико-химические методы анализа, в частности рентгенофлуоресцентную спектрометрию (ГОСТ Р 55879-2013).

### 3.14. Определение спекаемости по Грей-Кингу

Метод определения спекаемости по Грей-Кингу не получил широкого распространения при построении моделей. По нашему мнению, это связано с тем, что результатом метода является нечисловое, а буквенное обозначение типа королька (рисунок 41).

Буквенное обозначение сложно использовать в математических моделях. Даже если сопоставить каждой букве А, В, С ... значение натурального ряда 1, 2, 3 ..., то мы будем иметь дело с дискретными величинами, которые также неудобно использовать в моделях при их построении и использовании.

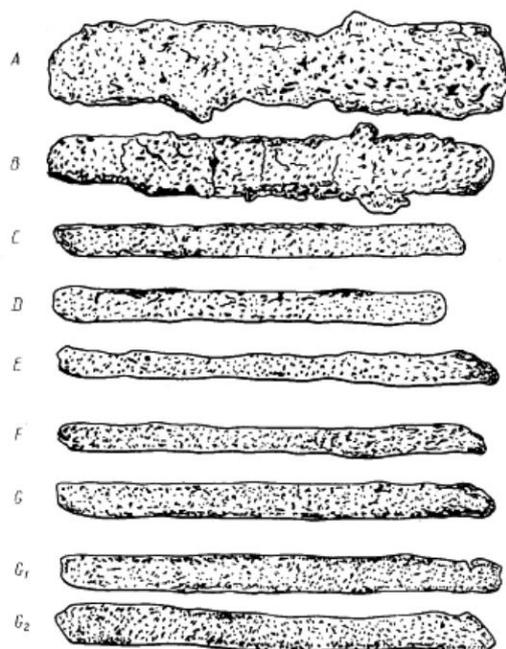
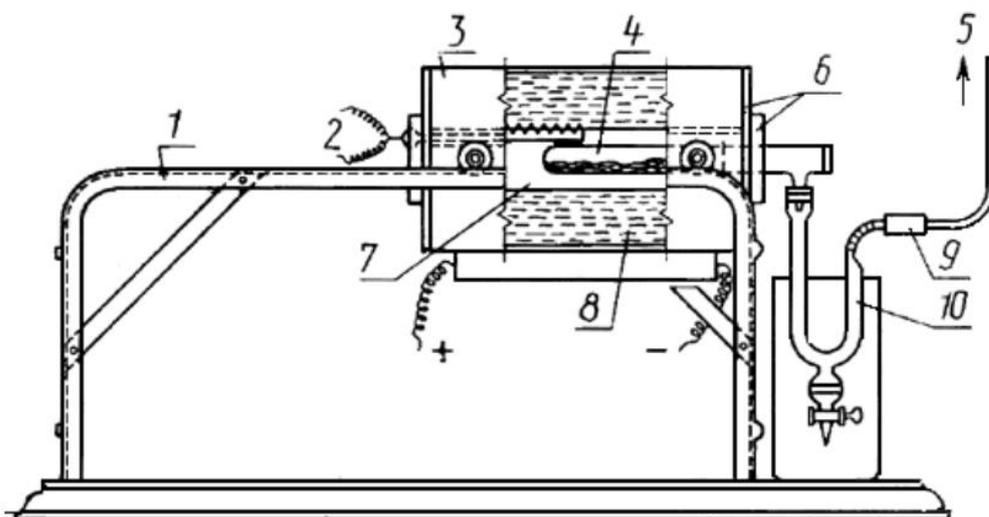


Рисунок 41 – Типы корольков по Грей-Кингу

Сущность метода Грей-Кинга заключается в нагреве пробы угля в стандартных условиях до температуры 600°С. Полученный остаток полукокса классифицируют сравнением его с эталонной шкалой образцов (рисунок 41). Если полученный коксовый остаток настолько вспучен, что заполняет поперечное сечение реторты, определение повторяют с углем, смешанным с соответствующим количеством электродного углерода или эквивалентного материала. Тип кокса по Грей-Кингу для сильно вспучивающихся углей определяют по минимальному количеству электродного углерода, необходимого для того, чтобы получить прочный каменноугольный коксовый остаток с тем же объемом, что и для смеси исходного угля и электродного углерода.

Для изготовления королька используют печь, конструкция которой представлена на рисунке 42.



- 1 – направляющие планки; 2 – термопара; 3 – металлический защитный кожух;
- 4 – реторта; 5 – газ к горелке или наружу; 6 – жаропрочный материал;
- 7 – силиконовая трубка длиной 300 мм, внутренним диаметром 52-55 мм, толщиной стенки 6 мм, нагревательный элемент – нихромовая проволока 0,6 мм; 8 – магнезиально-асбестовый состав; 9 – боковой патрубок; 10 – приемник

Рисунок 42 – Печь для проведения испытания спекаемости по Грей-Кингу

Электрическая печь имеет внутренний диаметр 50 мм, длину 300 мм. Один конец закрыт и имеет на другом конце пробку из изоляционного материала, в которой по центру просверлено отверстие диаметром 25 мм. Печь должна обеспечивать постоянную температуру в ее средней части на участке длиной 200 мм от 300 до 600°С с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Непосредственно спекание угольной навески происходит в реторте (рисунок 43). Реторта представляет собой трубку из кварцевого или термостойкого прозрачного стекла внутренним диаметром 20 мм и длиной 300 мм, запаянную

с одного конца, с боковым отводом, внутренний диаметр которого 8 мм, длина 50 мм, припаянным на расстоянии около 20 мм от открытого конца реторты. Реторта должна иметь гладкие стенки и может быть цилиндрической или конусообразной (от 19 до 21 мм) формы, причем открытый конец должен быть большего диаметра.

Пробу угля, используемую для определения типа кокса по методу Грей-Кинга, измельчают до полного прохождения через сито с размером ячеек 200 мкм. Угольная навеска для испытания составляет  $(20 \pm 0,01)$  г. Нагревают печь до температуры  $325^{\circ}\text{C}$ . Далее вводят реторту с пробой угля. Регулируют подачу энергии таким образом, чтобы после введения реторты в печь исходная температура  $325^{\circ}\text{C}$  установилась в течение 3–7 мин, а затем равномерно повышалась с постоянной скоростью  $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  до  $590^{\circ}\text{C}$ . Затем нагревание регулируют таким образом, чтобы после достижения температуры  $600^{\circ}\text{C}$  эта температура печи сохранялась постоянной в течение 15 мин.

Вынимают реторту (или отодвигают печь) и охлаждают. Отсоединяют приемник, удаляют пробку и осторожно извлекают коксовый остаток для исследования.

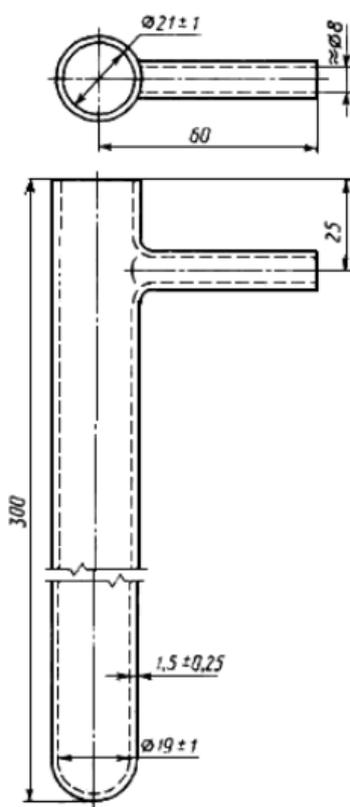


Рисунок 43 – Реторта для испытания спекаемости угля по Грей-Кингу

Далее королёк из реторты сопоставляют с эталонами (рисунок 41), обозначают соответствующей буквой и дают словесное описание королька.

### 3. Контрольные вопросы и тесты

#### 3.1. Контрольные вопросы к первому разделу

1. Что понимается под технологическим процессом?
2. Что изучает химическая технология?
3. Какие элементарные стадии химико-технологического процесса (ХТП) считаются основными?
4. В зависимости от закономерностей, характеризующих протекание ХТП, процессы классифицируются в рамках пяти групп, - перечислите их.
5. Дайте определение понятию «моделирование».
6. Какой смысл вкладывается в понятия «объект-оригинал» и «модель»?
7. Норберт Винер – основоположник кибернетики – говорил, что «.. наилучшей моделью кота<sup>17</sup> является другой кот, а еще лучше – тот же самый кот». Как Вы понимаете суть этого высказывания?
8. Наибольшее распространение в инженерной практике получило математическое и физическое моделирование. Что лежит в основе каждого из методов?
9. Существует точка зрения, что «математическое моделирование – третий путь познания», а каковы первые два пути познания окружающего мира?
10. Если результаты моделирования удовлетворяют исследователя и могут служить основой для прогнозирования поведения или свойств исследуемого объекта, то говорят, что модель адекватна объекту. От чего зависит степень адекватности модели? Почему идеально адекватная модель принципиально невозможна?

#### *Тест*

1. Процесс построения модели называется:
  - (1) Конструирование
  - (2) Проектирование
  - (3) Моделирование
  - (4) Экспериментирование
2. Какое максимальное количество моделей одного объекта можно составить?
  - (1) Зависит от структуры данного объекта
  - (2) Одну

---

<sup>17</sup> Один из основоположников квантовой механики Эрвин Шрёдингер в 1935 году в статье «Текущая ситуация в квантовой механике» описал мысленный эксперимент с котом, с целью показать неполноту квантовой механики. В последствие в шуточных высказываниях его называли «Австрийский квантовый зоолог, одновременно убивший и не убивший кота в научных целях». В России издаётся научно-популярный журнал «Кот Шрёдингера».

- (3) Любое количество
- (4) В трехмерном пространстве не более трех
- 3. Как называется замещаемый моделью объект?
  - (1) Копия
  - (2) Оригинал
  - (3) Шаблон
  - (4) Макет
- 4. Математическая модель – это...
  - (1) математические уравнения, описывающие динамику системы
  - (2) математическое представление связей и отношений исследуемой системы
  - (3) математические обозначения, используемые в постановке задачи
  - (4) математический метод исследования поведения системы
- 5. Могут ли разные объекты быть описаны одной моделью?
  - (1) Нет
  - (2) Зависит от модели
  - (3) Да
  - (4) Зависит от объекта
- 6. Модель отражает...
  - (1) Существенные признаки объекта в соответствии с целью моделирования
  - (2) Все существенные признаки объекта
  - (3) Некоторые существенные признаки объекта
  - (4) Все высказывания неверны
- 7. Какое из утверждений соответствует понятию математическая модель объекта:
  - (1) Совокупность данных, содержащих информацию о количественных характеристиках объекта и его поведении в виде таблиц
  - (2) Совокупность математических соотношений, отражающих те или иные свойства объекта-оригинала или его функционирования
  - (3) Созданная из материала модель, точно отражающая (визуально схожая) признаки объекта-оригинала
  - (4) Ни одно из утверждений
- 8. Любая математическая модель должна (в рамках рассматриваемых гипотез моделирования) быть абсолютно ...
  - (1) Точной
  - (2) Идеальной
  - (3) Функциональной
  - (4) Адекватной

9. Какое из утверждений соответствует понятию физическая модель объекта:

- (1) Совокупность данных, содержащих информацию о количественных характеристиках объекта и его поведении
- (2) Совокупность математических соотношений, отражающих те или иные свойства объекта-оригинала или его функционирования
- (3) Созданная из материала модель, точно отражающая (визуально схожая) признаки объекта-оригинала
- (4) Ни одно из утверждений

10. Правильный порядок указанных этапов математического моделирования процесса:

- 1) Анализ результатов,
- 2) Проведение исследования,
- 3) Определение целей моделирования,
- 4) Поиск математического описания

соответствует последовательности:

- (1) 3-4-2-1;
- (2) 1-2-3-4;
- (3) 2-1-3-4;
- (4) 3-1-4-2.

### **3.2. Контрольные вопросы ко второй главе**

#### ***Контрольные вопросы***

1. Дерево, наиболее доступное топливо в доисторическую эпоху, для выплавки железа было непригодно, т.к. не может обеспечить необходимую температуру, при которой идет восстановление железа из руды. Почему каменный уголь, сжигание которого обеспечивает необходимую температуру, невозможно напрямую применять для восстановления железа?
2. Почему обугливание древесины без сгорания позволяет повысить эффективность топлива, т.е. такое топливо позволяет получать существенно более высокую температуру?
3. В одном из средневековых документах утверждается: «...чтобы поддерживать огонь железодельного завода, вокруг совершались настоящие жертвоприношения». О каком жертвоприношении идет речь?
4. Сколько лет насчитывает истории «изобретения» каменноугольного кокса?
5. Почему каменноугольный кокс вытеснил древесный уголь?

6. Патент на производство железа и выплавку свинца «с использованием земляного угля, морского угля и торфа» получили в 1589 г. Томас Проктор и Виллиам Петерсон. Почему название «морской уголь» («sea coal»), часто встречающееся в текстах до XVIII в., не используется в настоящее время?
7. В 1681 году Иоганн Бехер получил патент в Англии на способ производства смолы путем перегонки угля в ретортах. Где в основном использовалась получаемая таким способом смола?
8. Патенты систематически выдавались в Венецианской Республике с 1450 года, где был издан указ, согласно которому о новых и изобретательских устройствах необходимо было сообщать Республике, чтобы получить правовую защиту от потенциальных нарушителей. Как Вы считаете, о защите какого продукта в основном шла речь?
9. В чем разница между стандартами, имеющими аббревиатуру ТУ, ГОСТ, ISO?
10. Как в настоящее время расшифровывается аббревиатуру ГОСТ? Является ли он обязательным стандартом для всей продукции, выпускаемой в России?

### *Тест*

1. Высшая теплотворная способность древесины ( $Q$ ) определяется как сумма теплотворных способностей отдельных химических элементов, получаемых при их свободном сгорании ( $C$ ,  $H$  и  $O$  — содержание в древесине соответственно углерода, водорода и кислорода в процентах). Для древесины приближенно она может быть определена по формуле Д. И. Менделеева. Какая из формул, приведенных ниже, справедлива?
  - (1)  $Q = 81C + 300H + 26O$
  - (2)  $Q = 81C - 300H - 26O$
  - (3)  $Q = 81C - 300H + 26O$
  - (4)  $Q = 81C + 300H - 26O$
2. В зависимости от породы древесины (ГОСТ 24260-80 «Сырьё древесное для пиролиза и углежжения»), используемой для производства древесного угля, выделяют три группы:
  1. группа - лиственные породы деревьев с твердой древесиной (береза, дуб, граб, бук, вяз и т.д.);
  2. группа - хвойные породы деревьев (ель, сосна и т.д.);
  3. группа - лиственные породы деревьев с мягкой древесиной (осина, липа, ива, ольха, тополь.) Наиболее качественный уголь можно получить из пород:

- (1) Первой группы
- (2) Третьей группы
- (3) Второй группы
- (4) 50% первой, 35 % второй и 15% третьей

3. Какое из утверждений верно?

- (1) Если использовать лиственные породы деревьев с мягкой древесиной, то выход 1 тонны угля получается с  $11 \text{ м}^3$  древесины. При использовании лиственных пород деревьев с твердой древесиной  $7 \text{ м}^3$  на 1 тонну угля.
- (2) Если использовать лиственные породы деревьев с твердой древесиной, то выход 1 тонны угля получается с  $11 \text{ м}^3$  древесины. При использовании лиственных пород деревьев с мягкой древесиной  $7 \text{ м}^3$  на 1 тонну угля.
- (3) Если использовать хвойные породы деревьев, то выход 1 тонны угля получается с  $11 \text{ м}^3$  древесины. При использовании лиственных пород деревьев с мягкой древесиной  $7 \text{ м}^3$  на 1 тонну угля
- (4) Если использовать лиственные породы деревьев с твердой древесиной, то выход 1 тонны угля получается с  $7 \text{ м}^3$  древесины. Если использовать хвойные породы деревьев, то выход 1 тонны угля получается с  $11 \text{ м}^3$  древесины.

4. Какое из утверждений верно?

- (1) Удельная теплота сгорания доменного кокса составляет 30,5 МДж/кг, что превышает удельную теплоту сгорания древесного угля
- (2) Удельная теплота сгорания доменного кокса составляет 30,5 МДж/кг, что не превышает удельную теплоту сгорания древесного угля
- (3) Удельная теплота сгорания доменного кокса составляет 34,5 МДж/кг, что сопоставимо с удельной теплотой сгорания древесного угля
- (4) Удельная теплота сгорания доменного кокса составляет 34,5 МДж/кг, что превышает удельную теплоту сгорания древесного угля.

5. Доменный кокс используют для выплавки чугуна, основными компонентами которого являются железо и углерод. Чугуну соответствует сплав железа с углеродом при содержании углерода в нем:

- (1) В интервале от 2,14 до 6,67 весового %
- (2) В интервале от 2,14 до 6,67 атомного %
- (3) В интервале от 3,14 до 6,67 весового %
- (4) В интервале от 3,14 до 6,67 атомного %

6. Сколько лет насчитывает история «изобретения» каменноугольного кокса?

- (1) История «изобретения» примерно совпадает с возрастом Аркаима (Южный Урал) – 4 тысячи лет.

- (2) История «изобретения» начинается примерно с IV – III вв. до н.э. в Древнем Китае.
- (3) История «изобретения» начинается примерно 200 – 250 лет назад
- (4) Ни один из ответов не верен
7. Когда в России был принят общий закон о привилегиях на изобретения?
- (1) в 1612 г.
- (2) в 1701 г.
- (3) в 1812 г.
- (4) в 1861 г.
8. Какое из утверждений верно?
- (1) В связи с глобализацией экономической деятельности была создана международная организация (ISO), занимающаяся вопросами стандартизации в 1946 году, а начиная с 1991 года в России действуют национальные аналоги данных стандартов.
- (2) В связи с глобализацией экономической деятельности была создана международная организация (ISO), занимающаяся вопросами стандартизации в 1936 году, а начиная с 2001 года в России действуют национальные аналоги данных стандартов.
- (3) В связи с глобализацией экономической деятельности была создана международная организация (ISO), занимающаяся вопросами стандартизации в 1956 году, а начиная с 1991 года в России действуют национальные аналоги данных стандартов.
- (4) В связи с глобализацией экономической деятельности была создана международная организация (ISO), занимающаяся вопросами стандартизации в 1946 году, а начиная с 2001 года в России действуют национальные аналоги данных стандартов.
9. К основным нормативным документам в России относятся:
- (1) Национальный стандарт (ГОСТ), Отраслевой стандарт (ОСТ), Стандарт предприятия (СТП), Стандарт научно-технических инженерных обществ и общественных объединений (СТО), Технические условия (ТУ)
- (2) Национальный стандарт (ГОСТ), Отраслевой стандарт (ОСТ), Стандарт предприятия (СТП), Стандарт научно-технических инженерных обществ и общественных объединений (СТО), Технические условия (ТУ) – в случае ссылке на них в контракте или договоре.
- (3) В первом пункте Стандарт научно-технических инженерных обществ и общественных объединений (СТО) не относится к основным нормативным документам в России

(4) Во втором пункте «Технические условия (ТУ) – в случае ссылки на них в контракте или договоре» не относится к основным нормативным документам в России

10. Какое из утверждений верно?

(1) По желанию правообладателя государственной регистрации права подлежат программы для ЭВМ и базы данных, в которых содержатся сведения, составляющие государственную тайну.

(2) По желанию правообладателя государственной регистрации права подлежат программы для ЭВМ и базы данных.

(3) По желанию правообладателя государственной регистрации права подлежат только базы данных.

(4) По желанию правообладателя государственной регистрации права подлежат только программы для ЭВМ.

### **3.3. Контрольные вопросы к третьему разделу**

#### ***Контрольные вопросы***

1. Назовите основные показатели качества кокса, которые являются выходными параметрами при моделировании.

2. Назовите технологические параметры коксования, которые применяются в моделях в качестве входных параметров.

3. Каковы показатели качества шихты и исходных углей, используемые в качестве входных параметров.

4. Укажите, какие показатели качества углей и шихты возможно определить на основе существующих методов.

5. Перечислите основные группы микрокомпонентов угля, которые можно определить методом микроскопии.

6. Перечислите микрокомпоненты угля, которые используют для вычисления суммы спекающих компонентов.

7. Перечислите микрокомпоненты угля, которые используют для вычисления отощающих компонентов.

8. Назовите основные этапы методики определения показателя отражения витринита  $R_0$ , суммы спекающих СК и отощающих ОК компонентов.

9. Сформулируйте последовательность проведения анализа по определению влажности углей или шихты для коксования. Объясните назначение каждого из этапов.

10. Опишите последовательность этапов проведения анализа по определению зольности углей или шихты для коксования. Объясните назначение каждого из этапов.

11. Назовите последовательность этапов проведения методики по определению выхода летучих веществ из углей или шихты для коксования. Объясните назначение каждого из этапов.
12. Поясните принцип пересчёта с одного состояния топлива в другое (рабочее состояние, сухое, сухое беззольное, органическое и т.д.) и приведите соответствующие формулы.
13. Опишите последовательность этапов пластометрического испытания в аппарате Сапожникова.
14. Укажите основные этапы, необходимые для определения индекса Рога.
15. Опишите методику проведения испытания в пластометре Гизелера.
16. Назовите основные этапы методики определения вспучивания по ИГИ-ВУХИНу.
17. Опишите основные этапы проведения испытания дилатометрических свойств по ИГИ-ДМетИ.
18. Как вы считаете, в чём состоят отличия между методиками ИГИ-ВУХИН, ИГИ-ДМетИ и испытанием в аппарате Сапожникова? Какая из методик на ваш взгляд предпочтительна в производственных условиях и почему?
19. Опишите методику определения выхода жидкоподвижных продуктов из пластической массы угля.
20. Укажите основные этапы определения размолоспособности угля и шихты по методу Хардгрова.
21. Поясните, в чём состоит различие между высшей и низшей теплотами сгорания.
22. В чём различия между «адиабатическим» и «изопериболическим» процессами при определении высшей и низшей теплот сгорания. Приведите примеры возможных температурных профилей в случае адиабатического и изопериболического процессов.
23. Приведите формулы вычисления  $VI$  и  $MVI$  и поясните физический смысл переменных.
24. Как вы считаете, в чём заключается необходимость изучения методов определения параметров углей и шихты при моделировании механических показателей качества кокса.

### *Тест*

1. Какое минимальное количество зёрен необходимо рассмотреть при определении показателя  $R_0$  шихты:
  - (1) 100
  - (2) 200
  - (3) 300

- (4) 400  
(5) 500
2. Какой класс крупности угля и шихты идёт на изготовление аншлиф-брикета при определении  $R_0$
- (1) 0,5-1,0  
(2) 0,75-1,2  
(3) 0,9-1,4  
(4) 1,0-1,6  
(5) 2,0-3,0
3. Какие микрокомпоненты не учитывают при определении суммы спекающихся компонентов  $СК$ :
- (1) Витринит  
(2) Фюзенит  
(3) Липтинит  
(4) Семивитринит
4. Какой компонент входит в состав отошающих компонентов  $ОК$ :
- (1) Витринит  
(2) Липтинит  
(3) Микстинит  
(4) Коллинит
5. Что такое  $n$ , параметр, который откладывают по оси ординат на графике рефлектограммы при определении показателя отражения витринита  $R_0$ :
- (1) Показатель преломления  
(2) Показатель отражения  
(3) Число зёрен витринита, обладающее показателем отражения в интервале, с указанным по оси абсцисс  
(4) Число частиц в системе
6. Какая масса навески идёт на испытание пробы угля на аналитическую влажность
- (1) 0,5 г  
(2) 1,0 г  
(3) 1,5 г  
(4) 2,0 г
7. Какая температура должна быть по стандарту в муфельной печи при определении зольности:
- (1)  $700 \pm 10$  °С  
(2)  $750 \pm 15$  °С  
(3)  $815 \pm 10$  °С  
(4)  $900 \pm 15$  °С

8. Какой промежуток времени необходимо выдержать навеску угля при определении зольности:

- (1) 7 мин
- (2) 15 мин
- (3) 30 мин
- (4) 60 мин

9. Какая масса навески идёт на испытание пробы угля на зольность

- (5) 0,5 г
- (6) 1,0 г
- (7) 1,5 г
- (8) 2,0 г

10. Какая температура должна быть в муфельной печи при испытании на выход летучих веществ:

- (1)  $800 \pm 10$  °C
- (2)  $815 \pm 10$  °C
- (3)  $900 \pm 5$  °C
- (4)  $950 \pm 10$  °C

11. Какая масса навески идёт на испытание пробы угля на выход летучих веществ

- (1) 0,5 г
- (2) 1,0 г
- (3) 1,5 г
- (4) 2,0 г

12. Каким символом обозначается выход летучих веществ в сухом беззольном состоянии

- (1)  $V^a$
- (2)  $W^a$
- (3)  $V^d$
- (4)  $V^{daf}$

13. Какое время необходимо выдержать навеску угля при определении выхода летучих веществ:

- (1) 7 мин
- (2) 15 мин
- (3) 30 мин
- (4) 60 мин

14. На каком аналитическом методе основано испытание на влажность, зольность и выход летучего вещества:

- (1) Седиментационный анализ

- (2) Гравиметрический анализ
- (3) Фотометрический анализ
- (4) Объёмный анализ

15.Какая масса навески идёт на пластометрическое испытание в аппарате Сапожникова:

- (1) 50 г
- (2) 100 г
- (3) 150 г
- (4) 200 г

16.Какой класс крупности угля или шихты используют при пластометрическом испытании в аппарате Сапожникова:

- (1) 0-1 мм
- (2) 0-1,6 мм
- (3) 0-3 мм
- (4) 1,6-5 мм

17.Какое количество класса менее 0,5 мм должно содержаться в пробе угля или шихты при испытании в аппарате Сапожникова:

- (1) не более 40%
- (2) не менее 40%
- (3) не более 80%
- (4) не менее 80%

18.Зольность пробы угля или шихты при испытании в аппарате Сапожникова должно составлять:

- (1) не более 8%
- (2) не более 10%
- (3) не более 12%
- (4) не менее 12%, но не более 15%

19.Какую операцию необходимо провести при превышении допустимой зольности угля при испытании в аппарате Сапожникова:

- (1) Прокалить пробу угля или шихты
- (2) Провести обогащение пробы
- (3) Увлажнить пробу угля или шихты
- (4) Доизмельчить пробу

20.Каков должен быть температурный режим нагрева пробы угля или шихты в аппарате Сапожникова

- (1) Сначала 250<sup>0</sup>С за 10 мин, далее 1<sup>0</sup>С в минуту
- (2) Сначала 250<sup>0</sup>С за 30 мин, далее 3<sup>0</sup>С в минуту
- (3) Сначала 500<sup>0</sup>С за 30 мин, далее 1<sup>0</sup>С в минуту
- (4) Сначала 500<sup>0</sup>С за 30 мин, далее 3<sup>0</sup>С в минуту

21. При достижении какой температуры прекращают измерение в пластометрическом стакане
- (1) 430 °С
  - (2) 530 °С
  - (3) 630 °С
  - (4) 730 °С
22. Чему равен внутренний диаметр пластометрического стакана на полувысоте при испытании в аппарате Сапожникова:
- (1) 50 мм
  - (2) 60 мм
  - (3) 80 мм
  - (4) 100 мм
23. Какие показатели определяют при пластометрическом испытании в аппарате Сапожникова:
- (1) Толщина пластического слоя  $y$ , мм
  - (2) Величина пластометрической усадки  $x$ , мм
  - (3) Вид пластометрической кривой, координаты  $x$  (абсцисса) –  $y$  (ордината)
  - (4) Только параметр под цифрой (1)
  - (5) Параметры под цифрами (1) и (2)
  - (6) Три параметра (1), (2) и (3)
24. Какая масса навески идёт на испытание при определении индекса Рога:
- (1) 1г испытуемого угля или шихты смешивают с 5 г эталонного антрацита
  - (2) 1г испытуемого угля или шихты смешивают с 1 г эталонного антрацита
  - (3) 5г испытуемого угля или шихты смешивают с 5 г эталонного антрацита
  - (4) 2г испытуемого угля или шихты без добавки эталонного антрацита
25. Какой фракционный состав должна иметь навеска пробы угля при определении индекса Рога:
- (1) навеска угля классом менее 0,2 мм при содержании класса 0,1-0,2 мм не менее 40%
  - (2) навеска угля классом менее 0,5 мм при содержании класса 0,2-0,3 мм не менее 60%
  - (3) навеска угля классом менее 1 мм при содержании класса более 0,5 мм не менее 40%

- (4) навеска угля классом 0-3 мм при содержании класса более 1,6 мм не менее 60%.

26. При какой температуре производят коксование спрессованного королька при определении индекса Рога:

- (1)  $750 \pm 5$  °С  
(2)  $850 \pm 10$  °С  
(3)  $950 \pm 20$  °С  
(4)  $1050 \pm 25$  °С

27. Какова продолжительность коксования пробы угля в муфельной печи по методике Рога:

- (1) 5 мин  
(2) 7 мин  
(3) 15 мин  
(4) 30 мин

28. Какова скорость и продолжительность вращения испытательного барабана в методе Рога:

- (1) Скорость  $10 \pm 2$  мин<sup>-1</sup>, время вращения 10 мин  
(2) Скорость  $30 \pm 2$  мин<sup>-1</sup>, время вращения 5 мин  
(3) Скорость  $50 \pm 2$  мин<sup>-1</sup>, время вращения 5 мин  
(4) Скорость  $100 \pm 2$  мин<sup>-1</sup>, время вращения 10 мин

29. Сколько раз проводится извлечение королька из барабана и рассев на сите в методе Рога:

- (1) Один раз  
(2) Два раза  
(3) Три раза  
(4) Четыре раза

30. Как обозначается индекс Рога

- (1)  $R_0$   
(2)  $R$   
(3)  $RI$   
(4)  $RO$

31. Каковы внутренний диаметр и глубина реторты Гизелера

- (1) 21,4 мм и 35,0 мм  
(2) 31,2 мм и 20,1 мм  
(3) 42,5 мм и 25,5 мм  
(4) 54,2 мм и 45,0 мм  
(5) 60,0 мм и 50,0 мм

32. Какова масса навески пробы угля при испытании в аппарате Гизелера:

- (1) 4 кг

- (2) 500 г
- (3) 100 г
- (4) 5 г
- (5) 1 г

33. Гранулометрический состав пробы угля для испытания в аппарате Гизелера составляет:

- (1) Крупность не более 425 мкм, при содержании класса менее 212 мкм не более 50%
- (2) Крупность не более 425 мм, при содержании класса менее 212 мм не более 50%
- (3) Крупность не более 425 нм, при содержании класса менее 0,5 н не более 50%
- (4) Крупность 0-3 мм, при содержании класса менее 0,5 мм не более 50%

34. Как расшифровываются единицы измерения кд/мин при испытании в аппарате Гизелера. Сколько единиц кд эквивалентно  $360^\circ$  (полный оборот барабана-мешалки)

- (1) Килодин в минуту,  $360$  кд соответствует  $360^\circ$
- (2) Килограмм-делений в минуту,  $360$  кд соответствует  $360^\circ$
- (3) Круговых делений в минуту,  $100$  кд соответствует  $360^\circ$
- (4) Колец-делений в минуту,  $100$  кд соответствует  $360^\circ$

35. Какие параметры можно определить по результатам испытания в аппарате Гизелера:

- (1) Исходная температура размягчения; максимальная текучесть (кд/мин), выраженная в виде значения десятичного логарифма.
- (2) Максимальная температура текучести;
- (3) Температура затвердевания: Область пластичности.
- (4) Только (1) и (2) позиции
- (5) Позиции (1), (2) и (3).

36. Каким образом обозначается логарифм максимальной текучести – параметр, который наиболее часто используют в зарубежных математических моделях:

- (1)  $Lg (M)$
- (2)  $Log (F)$
- (3)  $Lg (MF)$
- (4) все выражения неверно передают обозначения максимальной текучести

37. Какова масса навески при определении числа вспучивания по методу ИГИ-ВУХИН:

- (1)  $1 \pm 0,01$  г
- (2)  $2 \pm 0,01$  г
- (3)  $3 \pm 0,0002$  г
- (4)  $4 \pm 0,0002$  г
- (5)  $5 \pm 0,01$  г

38. Гранулометрический состав пробы угля для испытания по методу ИГИ-ВУХИН составляет:

- (1) размер частиц до 0,2 мм, выход класса 0,1-0,2 не менее 40%
- (2) размер частиц до 0,5 мм, выход класса 0,1-0,2 не менее 10%
- (3) размер частиц до 1,0 мм, выход класса 0,1-0,2 не менее 40%
- (4) размер частиц 0-3 мм, выход класса 0,1-0,2 не менее 10%

39. При какой температуре проводят испытание на вспучиваемость по методу ИГИ-ВУХИНа

- (1)  $350 \pm 2^{\circ}\text{C}$
- (2)  $480 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- (3)  $580 \pm 10^{\circ}\text{C}$
- (4)  $780 \pm 15^{\circ}\text{C}$

40. Сколько составляет время выдержки в печи по методу ИГИ-ВУХИНа

- (1) 15 мин
- (2) 30 мин
- (3) 45 мин
- (4) 60 мин

41. Число вспучивания  $V_{сп}$  вычисляется как

- (1) Отношение высоты угольного брикета после нагревания к высоте брикета до нагревания
- (2) Отношение высоты угольного брикета до нагревания к высоте брикета после нагревания
- (3) Разница между высотой угольного брикета до и после нагревания
- (4) Разница между высотой брикета до и после нагревания, отнесенная к высоте до нагревания.

42. Какова масса навески при определении дилатометрических свойств по методу ИГИ-ДМетИ:

- (1) 1 г
- (2) 2 г
- (3) 3 г
- (4) 4 г

(5) 5 г

43. Какие должны быть температуры в печи по методике ИГИ-ДМетИ при испытании проб угля марок Ж, К и ОС:

(1) 300 и 400 °С

(2) 450 и 500 °С

(3) 470 и 600 °С

(4) 500 и 600 °С

44. Какой промежуток времени длится спекание пробы угля в муфеле по методу ИГИ- ДМетИ:

(1) 15 мин

(2) 30 мин

(3) 45 мин

(4) 60 мин

(5) Пока кривая не выйдет на «плато» (кривая переходит в прямую линию)

45. Какие показатели могут быть получены в ходе испытания по методу ИГИ-ДМетИ:

(1) Период начала вспучивания  $P_n$ , секунды

(2) Период вспучивания  $P_v$ , секунды

(3) Индекс вспучивания  $I_v$ , мм

(4) Все указанные выше параметры

46. Какова масса навески при определении жидкоподвижных продуктов из пластометрической массы угля в центробежном поле:

(1) 1 г

(2) 2 г

(3) 5 г

(4) 6 г

47. Из каких фракций состоит проба угля при определении жидкоподвижных продуктов из пластометрической массы угля в центробежном поле:

(1) 0-0,2 мм и 1-3 мм

(2) 0-1 мм и 1-3 мм

(3) 0-0,5 мм и 2-3 мм

(4) 0-0,2 мм и 2-3 мм

48. Какова скорость поднятия температуры при определении жидкоподвижных продуктов из пластометрической массы угля в центробежном поле

(1) 100°С за 5 мин, далее 70±5°С/мин до 400°С

(2) 200°С за 10 мин, далее 100±5°С/мин до 600°С

(3) 300°С за 5 мин, далее 70±5°С/мин до 600°С

(4) 400°С за 10 мин, далее 100±5°С/мин до 600°С

49. Выход жидкоподвижных компонентов из угля  $X$  рассчитывается как:

- (1) Произведение массы жидких продуктов на массу твёрдого остатка в процентах
- (2) Произведение массы жидких продуктов на массу исходной навески для анализа в процентах
- (3) Отношение жидкоподвижных продуктов к твёрдому остатку в процентах
- (4) Отношение жидкоподвижных остатков к исходной массе навески для анализа в процентах

50. Какова масса навески при испытании в аппарате Хардгрова на размолоспособность:

- (1)  $1 \pm 0,0002$  г
- (2)  $10 \pm 0,0002$  г
- (3)  $50 \pm 0,01$  г
- (4)  $100 \pm 0,1$  г

51. Какое количество оборотов совершает размольный механизм при испытании пробы в аппарате Хардгрова:

- (1)  $10 \pm 1$  об/мин
- (2)  $30 \pm 1$  об/мин
- (3)  $60 \pm 2$  об/мин
- (4)  $100 \pm 5$  об/мин

52. Какое химическое соединение выступает в качестве эталонного при установлении энергетического эквивалента калориметрической бомбы при определении высшей теплоты сгорания:

- (1) Фенол
- (2) Толуол
- (3) Бензол
- (4) Бензойная кислота

53. Какие поправки учитывают при расчёте высшей теплоты сгорания:

- (1) Поправка на растворение серной кислоты
- (2) Поправка на растворение азотной кислоты
- (3) Позиции (1) и (2)
- (4) Поправок не делают, так как значение высшей теплоты сгорания получается непосредственно после сжигания пробы в калориметрической бомбе

54. Низшая теплота сгорания отличается от высшей теплоты сгорания тем, что:

- (1) Вводится поправка на растворение соляной кислоты
- (2) Вводится поправка на конденсацию паров воды

(3) Вводится поправка на химические превращения, происходящие в золе

(4) Вводится поправка на изопериболичность калориметра

55. Какие из оксидов золы обладают непосредственным каталитическим действием при взаимодействии углерода кокса с углекислым газом.

(1)  $Na_2O, K_2O, CaO, MgO, Fe_2O_3$

(2)  $SiO_2, Al_2O_3$

(3)  $Na_2O, K_2O, CaO, MgO, Fe_2O_3, SiO_2, Al_2O_3$

(4)  $Na_2CO_3, K_2CO_3, CaCO_3, MgCO_3, FeCO_3$

56. Какова масса навески при испытании спекаемости по Грей-Кингу:

(1)  $1 \pm 0,0002$  г

(2)  $5 \pm 0,0002$  г

(3)  $20 \pm 0,01$  г

(4)  $100 \pm 0,01$  г

57. До какой температуры нагревают навеску угля при испытании спекаемости по Грей-Кингу:

(1)  $300^\circ C$

(2)  $400^\circ C$

(3)  $500^\circ C$

(4)  $600^\circ C$

58. При какой температуре загружают реторту в печь при испытании на спекаемость по методу Грей-Кинга

(1)  $100^\circ C$

(2)  $200^\circ C$

(3)  $325^\circ C$

(4)  $400^\circ C$

59. Из какого материала изготавливается реторта для проведения испытания по методу Грей-Кинга:

(1) Жаропрочная марка стали

(2) Кварцевое или термостойкое прозрачное стекло

(3) Графитированный углерод

(4) Корундовая керамика

60. Куда поступает отходящий полукоксовый газ, образующийся при испытании по методу Грей-Кинга?

(1) Собирается в газометр

(2) Компрессором закачивается в баллон

(3) Отводится к горелке или наружу (на улицу)

(4) Напрямую выпускается в лабораторию, так как газа образуется мало

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой части пособия рассмотрены основные показатели качества исходных углей и шихты для коксования, которые применяются в качестве входных параметров в математических моделях для прогнозирования механических показателей качества кокса. Каждый из параметров имеет свои достоинства и недостатки, которые обусловлены методикой получения конкретного показателя. По этой причине ещё до начала построения математической модели важно знать методику испытания и получения любого параметра, который будет применён в модели.

Знание методики испытания по различным параметрам важно ещё с одной стороны. Исторически большая часть моделей для прогнозирования показателей качества кокса построена по типу регрессии и чёрного ящика. Это означает, что имеются входные параметры (показатели качества исходных углей для коксования и шихты, которые рассмотрены в данном пособии) и выходные параметры (показатели качества кокса). Несмотря на то, что функциональная зависимость между входными и выходными параметрами научно и логически обоснована, по большому счёту, её установление происходит методом подбора.

Для создания новых технологий коксования важно иметь полное представление о протекании процесса. Это возможно только с помощью физико-математической модели, в которой описание происходит на основе фундаментальных переменных, а сама функция получена на основе физического наблюдения за процессом. В этой связи методика испытания угля является физическим проявлением коксования, физическим экспериментом, позволяет наглядно рассмотреть процесс. Наблюдение за процессом дает возможность обратить внимание на ранее считавшиеся несущественными детали коксования, которые могут быть встроены в модель, что позволит уточнить наше понимание механизма формирования кокса. Уточнение знаний о процессе коксования позволяет трансформировать и улучшать существующую технологию производства кокса и предлагать новые технологии, что важно для решения научной проблемы истощения сырьевой базы России хорошо коксующихся марок углей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безграмотный академик, или Как Меншиков стал членом Лондонского королевского общества. – Текст : электронный // Factopedia. Энциклопедия фактов : [<http://factopedia.ru/>]. – URL: <http://factopedia.ru/publication/4234> (дата обращения: 13.02.2022).
2. Математическое моделирование химико-технологических процессов: учебное пособие / Н.В. Ушева [и др.]. – Томск.: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 135 с.
3. Евдокимов, А.Н. Моделирование химико-технологических процессов (экспериментально-статистические модели) / А.Н. Евдокимов, А.В. Курзин. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. – 106 с.
4. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высш. шк., 1991. – 400 с.
5. Metallurgiya i vremya: Entsiklopediya. T. 2. Fundament industrial'noy tsivilizatsii. Возрождение и Новое время / Ю.С. Карабасов [и др.]. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2011. – 216 с.
6. Metallurgiya i vremya: Entsiklopediya. T. 4. Russkii vklad / Ю.С. Карабасов [и др.]. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2011. – 216 с.
7. Алексеев, В.В. Metallurgiya Urala s drevneyshikh vremён do nashikh dney / В.В. Алексеев, Д.В. Гаврилов. – М.: Наука, 2008. – 886 с.
8. Васильев, Г.А. Metallurgiya Yuzhnogo Urala: istoriya i sovremen'nost' / Г.А. Васильев, Д.И. Никитин, И.А. Новиков. – Челябинск: ГБУ ДПО «Челябинский институт», 2018. – 112 с.
9. Гаврилов, Д.В. Горнозаводский Урал XVII—XX вв. Избранные труды / Д.В. Гаврилов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 616 с.
10. Metallurgicheskie zavody Urala XVII—XX vv.: Entsiklopediya / под ред. В. В. Алексеева. – Екатеринбург: Издательство «Академкнига», 2001. – 536 с.
11. История патентного права. – Текст : электронный // Wikipedia : [[https://ru.abcdef.wiki/wiki/Main\\_Page](https://ru.abcdef.wiki/wiki/Main_Page)]. – URL: [https://ru.other.wiki/wiki/History\\_of\\_patent\\_law](https://ru.other.wiki/wiki/History_of_patent_law) (дата обращения: 13.02.2022).
12. История патентов в мире. – Текст : электронный // Бюро переводов Flarus : [<http://patent-translation.ru/>]. – URL: <http://patent-translation.ru/?smid=10> (дата обращения: 13.02.2022).
13. Про ГОСТы, ОСТы и ТУ. Часть I. – Текст : электронный // Информационный центр AfterShock : [<https://aftershock.news/>]. – URL: <https://aftershock.news/?q=node/696526&full> (дата обращения: 13.02.2022).

14. Что такое ГОСТ – расшифровка и назначение. – Текст : электронный // KtoNaNovenkogo.ru : [https://ktonanovenkogo.ru/]. – URL: https://ktonanovenkogo.ru/voprosy-i-otvety/gost-chto-eh-to-takoe-rasshifrovka.html (дата обращения: 13.02.2022).
15. История ISO – сложный поиск товарищей на вкус и цвет. – Текст : электронный // Единый Стандарт : [1cert.ru]. – URL: https://1cert.ru/stati/istoriya-iso-slozhnyu-poisk-tovarishchey-na-vkus-i-tsvet (дата обращения: 13.02.2022).
16. Methods of coke quality prediction: A review / N. Lauren, K. Blackmore, K. Nesbitt, M.R. Mahoney // Fuel. – 2018. – № 219. – pp. 426-445.
17. Models of coke quality prediction and the relationships to input variables: A review / N. Lauren, K. Blackmore, K. Nesbitt, M.R. Mahoney // Fuel. – 2018. – № 219. – pp. 446-466.
18. Diez, M.A. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking / M.A. Diez, R. Alvarez, C. Barriocanal // International Journal of Coal Geology. – 2002. – № 50(1–4). – p. 389-412.
19. Щукин, П.А. Исследование свойств металлургического кокса / П.А. Щукин, – М.: Металлургия, 1971 – 184 с.
20. Липатников, А.В. Оптимизация потребления угольного сырья в ПАО «ММК» на основе математического моделирования / А.В. Липатников, А.Е. Шмелёва, Е.Н. Степанов, Д.А. Шнайдер // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2018. – №4 (18). – С. 30-38.
21. Smirnov, A. N. Classification of Models for Predicting Coke Quality (M25 and M10) / A. N. Smirnov, V. N. Petukhov, D. I. Alekseev / Coke and Chemistry. – 2015. – № 5 (58). – С. 170-174.
22. Relation between microstructure characteristics of coal and coke and quality of coke / D-L. Zhang, T. Zeng, W-F. Li, P-Z. Wang, M-D. Zheng // [In Chinese]. Iron Steel. – 2011. – №46(1). – pp. 14–18.
23. Gupta, A. A coal-blending model: a tool for better coal blend preparation / A. Gupta, AK. Das, GIS. Chauhan // Coal Prep. – 2007. – №27(1–3). – pp. 28-38.
24. Прогноз прочности кокса на основе химико-петрографических параметров угольных шихт с учётом их пневмомеханической сепарации / А.С. Станкевич, Ю. В. Степанов, Р.Р. Гилязетдинов, Н.К. Попова // Кокс и химия. – 2005. – № 12. – С.14-21.
25. Модель прогноза показателей CSR и CRI на основе химико-петрографических параметров угольных шихт и условий их коксования / А.С.

Станкевич, Р. Р. Гилязетдинов, Н. К. Попова, Д.А. Кошкарров // Кокс и химия. – 2008. – № 9. – С. 37-44.

26. Станкевич, А.С. Определение технологической ценности углей, используемых для производства кокса / А.С. Станкевич, В.С. Станкевич // Кокс и химия. – 2011. – № 6. – С. 2-10.

27. Станкевич, А.С. Методика определения коксуюемости и технологической ценности углей пластов и их смесей / А.С. Станкевич, В.С. Станкевич // Кокс и химия. – 2012. – № 1. – С. 4-12.

28. Станкевич, А.С. Оптимизация качества кокса ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» с учетом особенностей угольной сырьевой базы / А.С. Станкевич, А.Е. Базегский // Кокс и химия. – 2013. – № 10. – С. 14-21.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Стандарты по определению параметров углей (действующие на момент 2021 года)

Обозначение стандарта	Название стандарта
ГОСТ 17070-2014	Угли. Термины и определения
ГОСТ 19242-73	Угли бурые, каменные и антрацит. Классификация по размеру кусков
ГОСТ 21489-76	Угли бурые, каменные и антрациты. Разделение на стадии метаморфизма и классы по показателю отражения витринита
ГОСТ 30313-95	Угли каменные и антрациты (Угли среднего и высокого рангов). Кодификация
ГОСТ 32356-2013	Угли каменные и антрациты окисленные Кузнецкого и Горловского бассейнов. Классификация
ГОСТ 33130-2014	Угли бурые, каменные и антрацит. Номенклатура показателей качества
ГОСТ 1137-64	Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и брикеты. Правила приемки по качеству
ГОСТ 1186-2014	Угли каменные. Метод определения пластометрических показателей
ГОСТ 1817-64	Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и брикеты. Метод приготовления сборных проб
ГОСТ 1916-75	Угли бурые, каменные, антрацит, брикеты угольные и сланцы горючие. Методы определения содержания минеральных примесей (породы) и мелочи
ГОСТ 2013-75	Угли каменные. Ускоренный метод определения спекаемости
ГОСТ 7714-75	Угли каменные и антрацит. Метод определения термической стойкости
ГОСТ 8719-90	Угли бурые, каменные и антрацит. Метод определения гигроскопической влаги
ГОСТ 8858-93	Угли бурые, каменные и антрацит. Методы определения максимальной влагоемкости
ГОСТ 8930-2015	Угли каменные. Метод определения окисленности
ГОСТ 9318-91	Угли каменные. Метод определения спекающей способности по индексу Рога
ГОСТ 9516-92	Уголь. Метод прямого весового определения влаги в аналитической пробе
ГОСТ 9521-2017	Угли каменные. Метод определения коксующести
ГОСТ 10100-84	Угли каменные и антрацит. Метод определения обогатимости

Обозначение стандарта	Название стандарта
ГОСТ 10175-75	Угли бурые, каменные, антрациты, углистые аргиллиты и алевролиты. Метод определения содержания германия
ГОСТ 11014-2001	Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Ускоренные методы определения влаги
ГОСТ 11055-78	Угли бурые, каменные и антрацит. Радиационные методы определения зольности
ГОСТ 11056-77	Угли каменные. Электрический метод определения массовой доли влаги
ГОСТ 12711-77	Угли бурые, каменные, антрацит и сланцы горючие. Метод определения массовой доли галлия
ГОСТ 13324-94	Угли каменные. Метод определения дилатометрических показателей в приборе Одибера-Арну
ГОСТ 14056-77	Угли каменные. Ускоренный метод определения дилатометрических показателей в приборе ИГИ-ДМетИ
ГОСТ 15489.1-93	Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Метод определения коэффициента размолоспособности по ВТИ
ГОСТ 15489.2-2018	Угли каменные. Метод определения коэффициента размолоспособности по Хардгроу
ГОСТ 15490-70	Угли бурые, каменные, антрацит и термоантрацит. Методы определения механической прочности
ГОСТ 16126-91	Уголь. Метод определения спекаемости по Грей-Кингу
ГОСТ 17621-89	Угли каменные. Метод определения выхода жидкоподвижных продуктов из пластической массы угля
ГОСТ 18384-73	Угли каменные. Петрографический метод определения степени обогатимости
ГОСТ 20330-91	Уголь. Метод определения показателя вспучивания в тигле
ГОСТ 21206-75	Угли каменные и антрацит. Метод определения микротвердости и микрохрупкости
ГОСТ 23227-78	Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и торф. Метод определения свободного оксида кальция в золе
ГОСТ 25543-2013	Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам
ГОСТ 26898-86	Угли бурые, каменные и антрацит. Ускоренный метод определения максимальной влагоемкости
ГОСТ 28823-90	Битуминозный уголь и антрацит. Методы петрографического анализа. Часть 4. Метод определения микролитотипного, карбоминеритного и минеритного состава
ГОСТ 28974-91	Угли бурые, каменные и антрациты. Методы определения бериллия, бора, марганца, бария, хрома, никеля, кобальта,

Обозначение стандарта	Название стандарта
	свинца, галлия, ванадия, меди, цинка, молибдена, иттрия и лантана
ГОСТ 32246-2013	Угли каменные. Метод спектрометрического определения генетических и технологических параметров.
ГОСТ 32247-2013	Угли каменные. Метод определения числа вспучивания по ИГИ-ВУХИН.
ГОСТ 32558-2013	Уголь. Определение насыпной плотности
ГОСТ 32561-2013	Уголь каменный. Метод определения пластических свойств на пластометре Гизелера с постоянным вращающим моментом.
ГОСТ 32976-2014	Угли каменные. Определение степени окисленности методом щелочной экстракции
ГОСТ 33619-2015	Угли бурые, каменные и антрацит. Стандартный метод определения прочности на сбрасывание
ГОСТ 33620-2015	Угли бурые, каменные и антрацит. Стандартный метод определения прочности в барабане
ГОСТ 33654-2015	Угли бурые, каменные и антрацит. Общие требования к методам анализа
ГОСТ 33656-2015	Угли каменные. Стандартный метод испытания пенной флотацией
ГОСТ ISO 15585-2013	Уголь каменный. Определение индекса спекаемости
ГОСТ Р 54247-2010	Уголь каменный. Определение пластических свойств на пластометре Гизелера
ГОСТ Р 55659-2013	Методы петрографического анализа углей. Часть 5. Метод определения показателя отражения витринита с помощью микроскопа
ГОСТ Р 55662-2013	Методы петрографического анализа углей. Часть 3. Метод определения мацерального состава
ГОСТ Р 55663-2013	Методы петрографического анализа углей. Часть 2. Методы подготовки проб углей
ГОСТ Р 55955-2014	Стандартная практика определения содержания газа в угле
ГОСТ Р 57010-2016	Общие требования к методам подготовки высокоминерализованной угольной пыли для анализа
ГОСТ Р 58221-2018	Методы петрографического анализа углей. Часть 1. Словарь терминов
ГОСТ 2111-2014	Угли кузнецкого бассейна для коксования. Метод установления границы зоны окисленных углей
ГОСТ Р 51587-2000	Угли каменные и антрациты Кузнецкого и Горловского бассейнов для цементных и известковых печей и производства кирпича. Технические условия

Обозначение стандарта	Название стандарта
ГОСТ Р 57012-2016	Стандартная практика по определению признаков окисления и самовозгорания углей
Топливо твёрдое минеральное	
ГОСТ 8606-2015	Топливо твердое минеральное. Определение общей серы. Метод Эшка
ГОСТ 147-2013	Топливо твёрдое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчёт низшей теплоты сгорания. Разработка ГОСТ. Прямое применение МС с дополнением - EQV (ISO 1928:2009).
ГОСТ 1932-93	Топливо твердое. Методы определения фосфора
ГОСТ 2059-95	Топливо твердое минеральное. Метод определения общей серы сжиганием при высокой температуре
ГОСТ 2093-82	Топливо твердое. Ситовый метод определения гранулометрического состава
ГОСТ 2160-2015	Топливо твердое минеральное. Определение действительной и кажущейся плотности
ГОСТ 2408.1-95	Топливо твердое. Методы определения углерода и водорода
ГОСТ 2408.3-95	Топливо твердое. Методы определения кислорода
ГОСТ 2408.4-98	Топливо твердое минеральное. Метод определения углерода и водорода сжиганием при высокой температуре
ГОСТ 3168-93	Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода продуктов полукоксования
ГОСТ 4790-2017	Топливо твердое. Определение и представление показателей фракционного анализа. Общие требования к аппаратуре и методике
ГОСТ 9326-2002	Топливо твердое минеральное. Методы определения хлора
ГОСТ 9517-94	Топливо твердое. Методы определения выхода гуминовых кислот
ГОСТ 10478-93	Топливо твердое. Методы определения мышьяка
ГОСТ 10538-87	Топливо твердое. Методы определения химического состава золы
ГОСТ 13455-91	Топливо твердое минеральное. Методы определения диоксида углерода карбонатов
ГОСТ 21708-96	Топливо твердое минеральное. Метод определения коэффициента абразивности золы
ГОСТ 27313-2015	Топливо твердое минеральное. Обозначение показателей качества и формулы пересчета результатов анализа на различные состояния топлива
ГОСТ 27379-87	Топливо твердое. Методы определения погрешности отбора и подготовки проб

Обозначение стандарта	Название стандарта
ГОСТ 28743-93	Топливо твердое минеральное. Методы определения азота
ГОСТ 29087-91	Топливо твердое минеральное. Метод определения хлора сжиганием при высокой температуре
ГОСТ 30404-2013	Топливо твердое минеральное. Определение форм серы
ГОСТ 30827-2002	Топливо твердое минеральное. Определение истирающей способности (абразивности)
ГОСТ 32465-2013	Топливо твердое минеральное. Определение серы с использованием ИК-спектрометрии
ГОСТ 32977-2014	Топливо твердое минеральное. Определение микроэлементов в золе атомно-абсорбционным действующий методом
ГОСТ 32978-2014	Топливо твердое минеральное. Определение плавкости золы
ГОСТ 32979-2014	Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота
ГОСТ 32980-2014	Топливо твердое минеральное. Определение содержания общей ртути
ГОСТ 32981-2014	Топливо твердое минеральное. Определение содержания общего кадмия
ГОСТ 32982-2014	Топливо твердое минеральное. Определение содержания общего фтора
ГОСТ 32983-2014	Топливо твердое минеральное. Определение металлов, экстрагируемых разбавленной соляной кислотой
ГОСТ 32984-2014	Топливо твердое минеральное. Определение макро- и микроэлементов в золе методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии
ГОСТ 33501-2015	Топливо твердое минеральное. Определение содержания общего фтора сжиганием в калориметрической бомбе с последующим определением в растворе с помощью ион-селективного электрода
ГОСТ 33502-2015	Топливо твердое минеральное. Определение содержания общего хлора сжиганием в калориметрической бомбе с последующим определением в растворе с помощью ион-селективного электрода
ГОСТ 33503-2015	Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе
ГОСТ 33623-2015	Топливо твердое минеральное. Метод определения равновесной влажности
ГОСТ Р 52911-2013	Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги
ГОСТ Р 53355-2018	Топливо твердое минеральное. Элементный анализ
ГОСТ Р 53357-2013	Топливо твердое минеральное. Технический анализ

Обозначение стандарта	Название стандарта
ГОСТ Р 54239-2018	Топливо твердое минеральное. Выбор методов определения микроэлементов
ГОСТ Р 54242-2010	Топливо твердое минеральное. Определение содержания общего мышьяка и селена
ГОСТ Р 55660-2013	Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ
ГОСТ Р 55661-2013	Топливо твердое минеральное. Определение зольности
ГОСТ Р 55879-2013	Топливо твердое минеральное. Определение химического состава золы методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии
ГОСТ Р 58227-2018	Топливо твердое минеральное. Метод определения минерального вещества

СМИРНОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ  
АЛЕКСЕЕВ ДАНИЛ ИГОРЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ЧАСТЬ I**

Учебное пособие

Подписано в печать 19.05.2022 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег.№ 234	Печать цифровая Тираж 100 экз.	Уч.-изд.л. 6,44

ФГАОУ ВО  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
Новотроицкий филиал  
462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.  
E-mail: nf@misis.ru  
Контактный тел. 8 (3537) 679729.

