

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

имени М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

БЕАТОН СОЛЕР Педро Анисел

УДК 621.18:662.636.1:662.61

ОБОСНОВАНИЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ КОТЛОВ
САХАРНЫХ ЗАВОДОВ РЕПУБЛИКИ КУБА ПРИ СЫГТАНИИ
НАТУРАЛЬНОГО БАГАСО ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ

Специальность 05.04.01 — Котлы, парогенераторы и
их агрегаты

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —
кандидат технических
наук доцент
ШЕСТАКОВ С.М.

Ленинград — 1989

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОВРЕМЕННЫЕ ВОПРОСЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ БАГАСО В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА В РЕСПУБЛИКЕ КУБА.....	9
1.1. Современное состояние энергетики Республики Куба.....	9
1.2. Значение багасо как топлива для экономики Рос- спублики Куба и основные характеристики багасо ..	15
1.3. Характеристики работы паровых котлов, сжигаю- щих багасо	25
1.4. Сжигание натурального багасо в паровых котлах большой мощности в других странах.....	37
1.5. Выводы по главе.....	44
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КОТЛА "РЕГО" (CV -25-18).....	46
2.1. Методы испытаний	46
2.1.1. Методика определения теплового баланса котла.....	46
2.1.2. Методы исследования температурных полей..	52
2.1.3. Методы исследования полей газового анализа	60
2.2. Результаты испытаний котла "Рего" (CV -25-18) ..	62
2.2.1. Характеристики объекта исследований.....	62
2.2.2. Тепловой баланс котла	65
2.2.3. Температурные поля топки.....	80
2.2.4. Поля газового анализа.....	90
2.3. Выводы по главе.....	98

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ, АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАСО.....	195 100
3.1. Теплофизические и аэродинамические характе- ристики багасо.....	210 100
3.1.1. Физические характеристики багасо.....	100
3.1.2. Теплофизические характеристики багасо..	105
3.1.3. Аэродинамические характеристики багасо .	108
3.2. Кинетические параметры процессов термического разложения и горения багасо.....	117
3.2.1. Методика проведения эксперимента и об- работки опытных данных.....	117
3.2.2. Исследование процесса термического разложения и горения натурального бага- со при разных концентрациях кислорода..	126
3.3. Выводы по главе.....	137
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ НАТУРАЛЬНОГО БАГАСО.....	141
4.1. Методика исследования и обработки экспери- ментальных данных.....	141
4.2. Экспериментальная установка для исследования процесса горения частиц натурального багасо....	144
4.3. Экспериментальное исследование процесса горо- ния частиц натурального багасо на стенде.....	147
4.4. Математическое моделирование горения конусной частицы багасо.....	163
4.5. Расчет горения конусной частицы натурального багасо в точке воспла "Рого" CV -25-18.....	174
4.6. Выводы по главе.....	191

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	195
ЛИТЕРАТУРА	200
ПРИЛОЖЕНИЯ	210

ВВЕДЕНИЕ

Энергетический потенциал составляет фактор первостепенного значения для гарантии экономического развития любой страны. Такой аспект приобретает особое значение в условиях такой страны как Куба, у которой отсутствуют значительные энергетические ресурсы. Этот факт послужил причиной принятия специальной энергетической программы, в которой среди фундаментальных аспектов рассматривается максимальное использование сахарного тростника как возобновляемого источника энергии /1,2,3/.

Ежегодно на Кубе получают примерно до $20 \cdot 10^6$ т багассо (отходов сахарного тростника), которое используется, во-первых, для удовлетворения энергетических потребностей сахарной промышленности, во-вторых, в качестве сырья для производства различных продуктов (фурурола, активированного угля, корма для животных, прессованных плит и т.д.).

Натуральное багассо представляет собой полидисперсный материал, размеры частиц которого варьируются в больших пределах, и характеризуется низким содержанием золы ($A^p = 2 \pm 0,5\%$) и высоким содержанием влаги ($W^p = 50 \pm 2\%$). Оно является высокоэнергетическим топливом из-за большого содержания летучих ($V^p = 42,5\%$).

Сегодня в стране работают около 800 котлов средней мощности, которые используют багассо как топливо. В этих котлах багассо сжигается в слое с очень низкой эффективностью. Более эффективное использование багассо как топлива требует реконструкции существующих котлов, что включает в себя применение более эффективных систем сжигания, повышение параметров пара и мощностей котлов. Это позволит увеличить прирост выработки электроэнергии, используя багассо как топливо. Большие перспективы при этом имеет сжигание багассо во взвешенном состоянии.

Разработка новой технологии для сжигания багассо требует предварительной оценки работы котлов, которые в настоящее время сжигают багассо на Кубе. Полное отсутствие экспериментальных данных о процессе горения натурального багассо во взвешенном состоянии требует проведения ряда исследований в этом направлении.

Целью настоящей работы является изучение процесса горения натурального багассо и оценка предпосылок для сжигания натурального багассо во взвешенном состоянии. Исходя из этого можно сформулировать следующие задачи исследований:

- анализ топок с горением багассо в слое и во взвешенном состоянии;
- проведение балансовых и внутритопочных испытаний одного из котлов, сжигающих багассо - "Рето" (CV-25-18);
- исследование аэродинамических характеристик частиц натурального багассо;
- исследование кинетики процессов выхода летучих и горения частиц натурального багассо;
- экспериментальное и расчетное исследование процесса горения частиц натурального багассо.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- впервые проведены испытания котла "Рето" (CV-25-18), сжигающего натуральное багассо в слое;
- впервые изучена аэродинамика одиночной частицы натурального багассо;
- проведено исследование кинетики выхода летучих и горения частиц натурального багассо;
- впервые изучено горение частиц натурального багассо в условиях, характерных для топок с горением во взвешенном состоянии;

- впервые проведены расчеты горения частиц натурального багасо в топочном объеме котла "Рето" CV -25-18.

Основная часть диссертации отражена в публикациях /79,99, 100,101/.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 101 наименований, 5 приложений и содержит 108 страниц машинописного текста, 69 рисунков, 33 таблиц.

Практическая ценность работы заключается в том, что приведенные в работе результаты испытаний котла "Рето" CV -25-18 могут быть использованы для оценки дальнейшего повышения КПД котла.

Полученные результаты исследований закономерностей процесса горения частиц натурального багасо могут быть использованы при разработке проекта реконструкции слоевых котлов для сжигания багасо во взвешенном состоянии, который позволит увеличить КПД и мощность котла. Экспериментальные данные автора по аэродинамическим и кинетическим характеристикам багасо могут быть также использованы для реализации этой цели.

Разработанная методика расчета процесса горения частиц натурального багасо в топке котла "Рето" может быть применена для анализа процесса в фанельно-слоевых топках.

Апробация работы. Основные результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции "Электроэнергетика социалистических и развивающихся стран (4 марта 1987 г.); научном семинаре филиала Министерства Сахарной Промышленности в городе Сантьяго-де-Куба (1989 г.); научных семинарах кафедры РИПТ ЛПИ им.М.И.Калинина (1986-1989 гг.); научных семинарах кафедры Теплоэнергетики Высшего Политехнического института им. Хулио Антонио Мейя (1987-1989 гг.).

Личный вклад. Личное участие автора в получении научных результатов выразилось в обобщении литературных данных по теме диссертации; постановке частных задач исследования; проведении испытаний и экспериментов; создании методики расчетов; обработке и обобщении экспериментальных данных и результатов расчетов.

I. СОВРЕМЕННЫЕ ВОПРОСЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ БАГАСО В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА В РЕСПУБЛИКЕ КУБА

I.1. Современное состояние энергетики Республики Куба

Кубинская энергетическая панорама отвечает запросам малой страны без крупных энергетических ресурсов и характеризуется большой зависимостью от импорта нефти. Необходимо отметить, что потребление энергии на Кубе значительно выросло после победы Кубинской революции; среднегодовой рост с 1960 по 1980 гг. был равен 4% / 4/. В этот период изменилась структура энергетического потребления топлива: увеличилось потребление багасо и дров на 11 и 4% соответственно (рис. I.1). Нужно отметить, что потребление багасо пропорционально зависит от уровня производства сахара. Последующее уменьшение потребления древесины объясняется использованием побочных продуктов нефтедобычи, керосина (71,2%) и сжиженного газа (15,4%), которые заменили древесный уголь.

Потребление электроэнергии с 1960 по 1980 годы выросло в 3 раза вследствие возросшего спроса промышленности и повышения уровня жизни населения. Рост электрической мощности происходил за счет строительства более экономичных станций. Удельный расход топлива с 1958 до 1982 года уменьшился на $121,6 \frac{\text{г}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$. В таблице I.1 показаны изменения в энергетических показателях за этот период.

Кубинское правительство уделяло много внимания энергетике, разумно сочетая требования народного хозяйства и энергетические возможности страны. Основными вопросами, которые составляли и составляют эту политику, являются:

I. Строгая экономия энергетических ресурсов, включающая широкое распространение среди населения тезиса о важности экономии

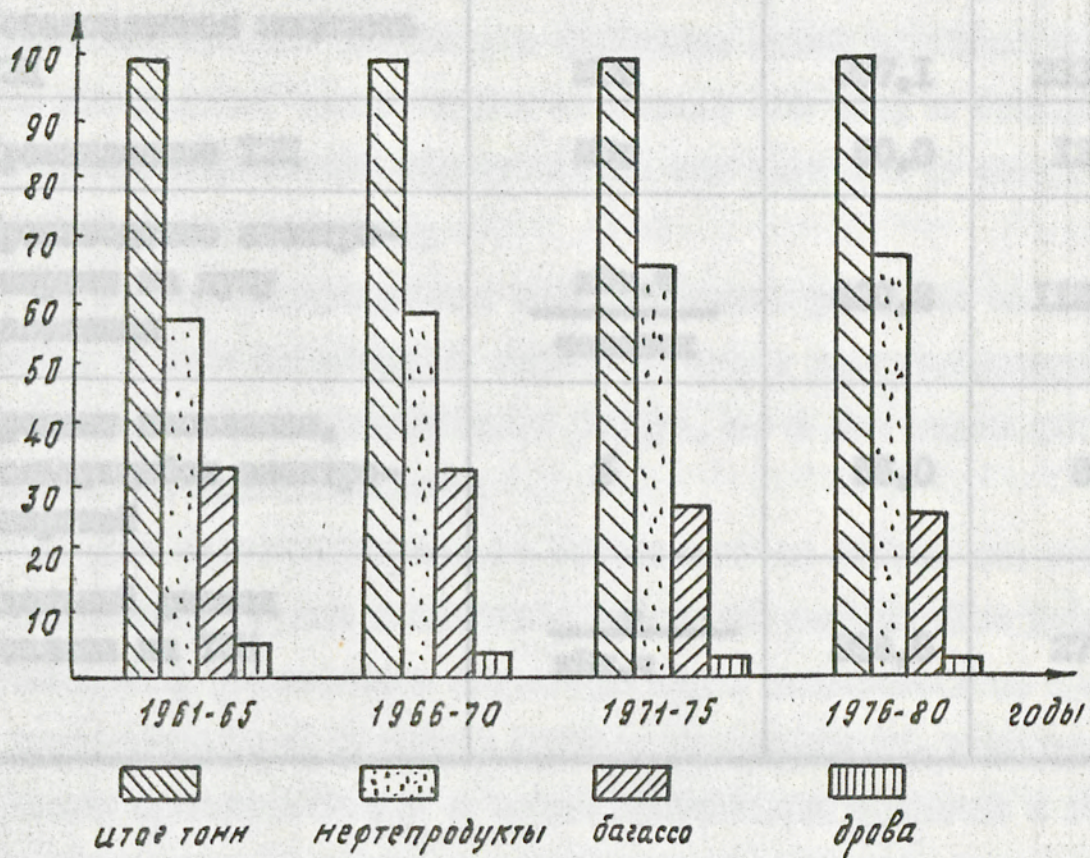


Рис. I. I. Структура энергетического потребления Республики Куба / 4 /.

Таблица I.I

Основные показатели энергетической системы

Республики Куба /4/

Энергетические показатели	Размерность	1958	1982
Наибольший спрос	МВт	343,9	1673,2
Установленная мощность ТЭЦ	МВт	397,1	2333,0
Промышленные ТЭЦ	МВт	50,0	130,0
Производство электроэнергии на душу населения	$\frac{\text{кВт.ч}}{\text{человек}}$	400,3	1125,5
Процент населения, пользующийся электроэнергией	%	56,0	86,0
Удельный расход топлива на ТЭЦ	$\frac{\text{т}}{\text{кВт.ч}}$	398,6	277

электроэнергии в быту; создание государственных организаций, предназначенных для планирования индустриального потребления электроэнергии и системы наказаний (штрафов) за перерасход электроэнергии; введение сезонных двухчасовых переходов; создание системы премирования за экономию электроэнергии;

2. строительство более современных теплоэлектростанций и развитие электроэнергетической национальной системы на базе использования атомной энергии; в настоящее время строится первая АЭС в центральной части страны мощностью 850 МВт; в ближайшие годы предусматривается строительство еще двух АЭС в западной и восточной частях острова;

3. замена импортируемых энергетических ресурсов на национальные; в этом направлении багасо занимает первоочередное место не только как энергетический ресурс, но и как сырье для перерабатывающей промышленности;

4. для более эффективного использования багасо как топлива для энергетики страны необходимо применить современную технологию сжигания; увеличивать параметры пара; устанавливать сушилки для предварительной подсушки багасо; разрабатывать технологию получения брикетов багасо с целью организации хранения и перевозки этого материала и использования его в период между сафрами;

5. большее использование солнечной энергии, т.к. этот ресурс чрезвычайно перспективен из-за географического положения Республики Куба, где средняя интенсивность солнечного излучения достигает $5 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$; годовое отклонение интенсивности солнечной радиации на Кубе от среднего значения составляет не более 10%, что позволяет иметь довольно однородный энергисточ-

ник в течение всего года / 5 /; солнечную энергию можно использовать для нагрева воды в нагревателях местного производства; для сушки сельскохозяйственных продуктов — фруктов, табака, багассо и других; в энергетических целях;

6. использование биомассы в качестве источника энергии, т.к. тропические условия Кубы благоприятствуют росту различной растительности, которая служит базой для использования биомассы как дополнительного источника энергии. В этом смысле сахарная солома имеет большую перспективу. По расчетам Гонзалеса / 6 / за одну сафру в 10 миллионов тонн сахара можно получить 22 миллиона тонн соломы с теплотой сгорания 16027.07 кДж/кг (влажностью 11,1%). Это соответствует по энергетическому потенциалу $49 \cdot 10^6$ тонн нефтяного эквивалента.

Кроме выше рассмотренных аспектов существуют и другие источники получения энергии: из городского мусора, из отходов животноводства; строительство средних, малых и сверхмалых гидроэлектростанций; использование энергии ветра, приливов и т.д. / 7, 8, 9 /.

Как выше было отмечено, употребление нефти с энергетической целью играет основную роль в энергетическом балансе Республики Куба. Багассо занимает второе место по эквивалентному расходу. В рисунке 1.2 приведен топливный баланс Республики Куба.

Расход мазута на тепловых станциях составляет более 50% от общего расхода нефтепродуктов. В настоящее время на Кубе работают 25 тепловых агрегатов мощностью 50 МВт и выше. В конце 1988 года был подключен к системе наиболее крупный агрегат мощностью 330 МВт.

Сахарная промышленность также является крупным производителем электроэнергии и занимает второе место среди остальных заводов.

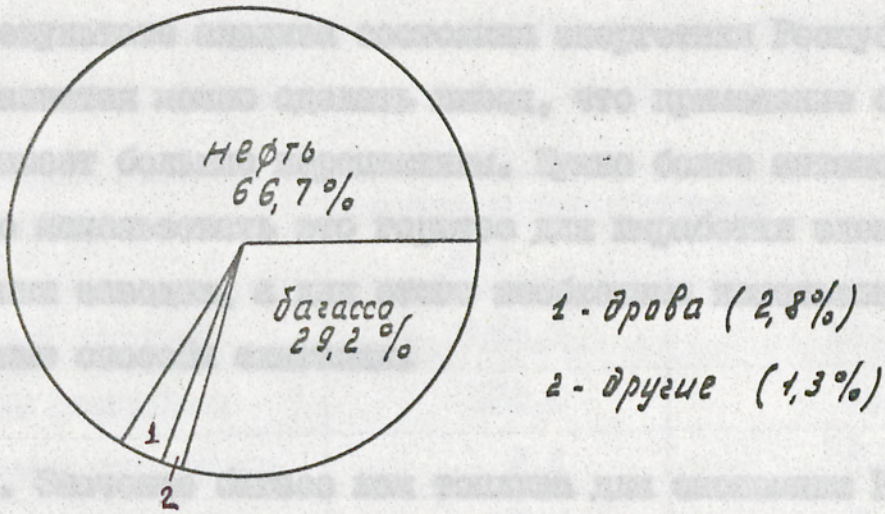


Рис. I.2. Топливный баланс Республики Куба.

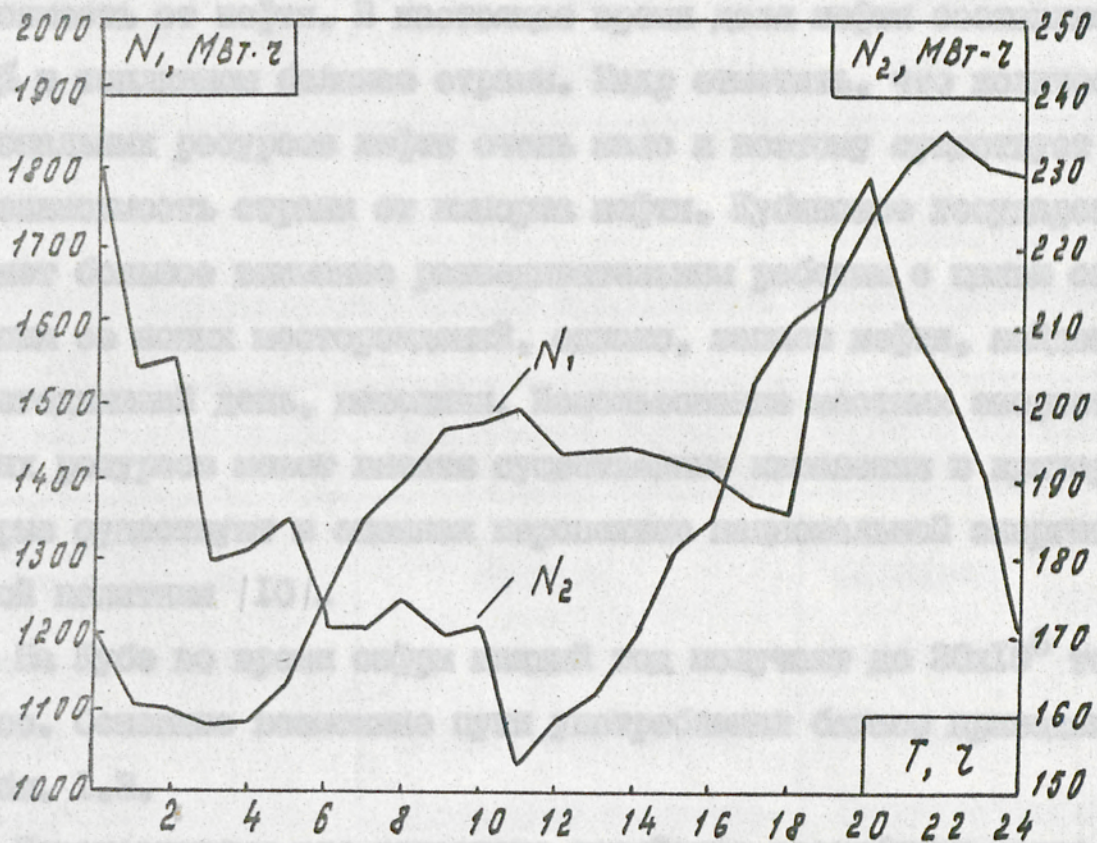


Рис. I.3. Суточный график выработки электроэнергии Республики Куба в период сафры.

N_1 - выработка электроэнергии на ТЭЦ.

N_2 - выработка электроэнергии на сахарных заводах.

отраслей страны по установленной мощности (таблица I.2).

В результате анализа состояния энергетики Республики и путей ее развития можно сделать вывод, что применение багасо как топлива имеет большие перспективы. Нужно более интенсивно и рационально использовать это горючее для выработки электроэнергии на сахарных заводах, а для этого необходимо использовать более эффективные способы сжигания.

I.2. Значение багасо как топлива для экономики Республики Куба и основные характеристики багасо

Характерной чертой энергетики Республики Куба является ее зависимость от нефти. В настоящее время доля нефти составляет 66,7% в топливном балансе страны. Надо отметить, что количество национальных ресурсов нефти очень мало и поэтому существует сильная зависимость страны от импорта нефти. Кубинское государство уделяет большое внимание разведывательным работам с целью определения ее новых месторождений, однако, запасы нефти, найденные на сегодняшний день, невелики. Использование местных энергетических ресурсов может внести существенные изменения в критерии, которые существуют в оценках перспектив национальной энергетической политики / IO /.

На Кубе во время сафры каждый год получают до 20×10^6 тонн багасо. Основные возможные пути употребления багасо приведены в табл. I.3.

Перспективным для народного хозяйства республики может быть так же использование золы багасо для производства стекла, в частности бутылок. Например, на Филиппинах производится до 5000 бутылок в сутки на основе золы багасо / II /.

Таблица I.2

Структура генерирующих мощностей энергетической
системы Республики Куба

Вид установки	Установленная мощность	
	МВт	%
Тепловые станции	2462,8	82,8
Газовые установки	100,0	3,4
Дизельные установки	6,4	0,2
Гидравлические станции	45,8	1,5
Промышленные станции	54,7	1,8
Установки сахарных заводов	306,5	10,3
Всего по системе	2976,2	100

Таблица I.3

Пути использования багасо и продуктов его переработки

В качестве топлива	В качестве волокнистых продуктов	Другое использование
производство электроэнергии	пульпа	фурфурол
угольные брикеты	бумага	альфа-целлюлоза
метан	камышитовая плита	пластики
спирт	багасовая теплоизоляция	белковый корм для скота
		багасовый бетон
		активированный уголь

Важным направлением использования багасо является его пиролиз для получения уксусной кислоты, кокса, метилового спирта, масляных продуктов, битума, неконденсирующихся газов и т.д. [12]. В Политехническом Институте имени Х.А.Мелья в городе Сантьяго-де-Куба была построена полупромышленная установка, на которой были проведены исследования пиролиза кубинского багасо, позволившие получить разные продукты процесса термоллиза багасо и других отходов.

Исходя из большого удельного веса дорогой импортной нефти для производства электроэнергии и действительных запасов нефти на Кубе, можно сделать вывод, что багасо является значительным энергетическим ресурсом в национальном топливном балансе. В настоящее время этот ресурс удовлетворяет практически все энергетические потребности самой сахарной промышленности. Кроме того, на сахарных заводах дополнительно производится около 10% электроэнергии всей страны. На рис. 1.3 приведен суточный график выработки электроэнергии на сахарных заводах и на ТЭЦ в период сафры.

Багасо в большинстве котлов традиционно сжигается в натуральном виде, в слое с низким коэффициентом полезного действия (см. раздел 1.3). (Содержание влаги в исходном багасо составляет около 50%). В связи с этим очень важным направлением является повышение экономичности паровых котлов сахарной промышленности, применение современных способов сжигания багасо, сжигание подсушенного багасо [13]. Это позволит получить дополнительное количество багасо для субпродуктной промышленности. В качестве примера в табл. 1.4 представлены расчеты для котла "Рето" (CV-25-18), которые дают представление об изменении количества получаемого пара из одной тонны сахарного тростника при разных КПД котла и

содержанием влаги в исходном батассо (содержание волокон батассо в сахарном тростнике составляет примерно 25% по весу при влажности 50%).

По химическому составу батассо можно отнести к лигню целлюлозным материалам и средние данные его химического состава близки к таким материалам (таблица 1.5).

Элементарный состав кубанского батассо очень близок к древесине (табл. 1.6). Можно отметить отсутствие в батассо азота и малое содержание в нем серы.

В работах [15, 16] приведены данные о качестве кубанского батассо — его технологические характеристики. Для расчета можно использовать средние значения, приведенные в таблице 1.7.

Батассо является высококалорийным топливом, т.е. выход летучих на органическую массу у него достигает 85-87%. Влажность его на рабочую массу достаточно высокая около 50% (табл. 1.6); зольность — мала, около 1,5%. По сравнению с древесиной (табл. 1.8) батассо имеет большую влажность и меньшее содержание золы на рабочую массу. Копе батассо относится к слабоспекающимся.

Для расчета теплоты сгорания батассо предложены многочисленные эмпирические выражения; наиболее употребительными из них являются [17]:

$$Q_B^P = 19410 - 51,5 \text{ сах.} - 1941,1 W^P, \quad \frac{K \Delta Ж}{K \Gamma}; \quad (1.1)$$

$$Q_H^P = 18103,72 - 51,55 S \text{ сах.} - 205,3 W^P, \quad \frac{K \Delta Ж}{K \Gamma}; \quad (1.2)$$

где Q_B^P , Q_H^P — низшая и высшая теплоты сгорания батассо;
 $S_{сах}$ — содержание сахара в батассо, % ,
 (обычно 1-3%); W^P — влажность батассо, %.

Зависимость теплоты сгорания батассо от влажности представлена на рис. 1.4 (S сах. = 2%).

Таблица I.4

Изменение количества получаемого пара из одной тонны сахарного тростника в зависимости от КПД котла

КПД котла, (%)	Влажность багассо, (%)	Выработка, тонн пара тонн тростника
80	50	0,583
90	50	0,656
80	15	0,670
90	15	0,754

Таблица I.5

Химический состав багассо и древесины (на сухую массу)

Компоненты	Солепечение, %		
	багассо / 13 /	древесина лиственных пород / 14 /	солома пшеницы / 14 /
лигнин	18,1	19,5	16,2
гемипеллюлоза	28,6	35,0	27,5
целлюлоза	33,2	39,0	39,4
вещества, растворимые в органических растворителях	8,1	3,1	3,6
вещества, растворимые в воде	9,6	-	7,2
зола	2,3	0,3	6,4

Таблица 1.6

Элементарный состав багаса и древесины

Элемент	Содержание, %		
	багасо	мягкая древесина / 14 /	древесина твер- долиственных пород / 14 /
C ^p	24,29	28,62	34,68
O ^p	21,357	20,952	27,132
H ^p	2,9	3,294	4,216
S ^p	0,053	-	-
W ^p	50	46	32
A ^p	1,4	0,918	1,7
N ^p	-	0,054	0,136

Таблица 1.7

Средние значения технологических характеристик
Кубанского багаса / 15 /

Составляющие	Содержание (%)
волокно	67,43
серцевина	20,33
зола и раство- римые вещества	12,24

Рис. 1.4. Изменение удельной теплоты сгорания в
зависимости от влаги.

Таблица 1.4

Влажность, %	Теплота сгорания, кДж/кг	Теплота сгорания, кДж/кг
7,43	15,4	12,9
11,53	15,4	12,9
15,63	15,4	12,9
19,73	15,4	12,9
23,83	15,4	12,9
27,93	15,4	12,9
32,03	15,4	12,9
36,13	15,4	12,9
40,23	15,4	12,9
44,33	15,4	12,9
48,43	15,4	12,9
52,53	15,4	12,9
56,63	15,4	12,9
60,73	15,4	12,9
64,83	15,4	12,9
68,93	15,4	12,9
73,03	15,4	12,9
77,13	15,4	12,9
81,23	15,4	12,9
85,33	15,4	12,9
89,43	15,4	12,9
93,53	15,4	12,9
97,63	15,4	12,9
101,73	15,4	12,9
105,83	15,4	12,9
109,93	15,4	12,9
114,03	15,4	12,9
118,13	15,4	12,9
122,23	15,4	12,9
126,33	15,4	12,9
130,43	15,4	12,9
134,53	15,4	12,9
138,63	15,4	12,9
142,73	15,4	12,9
146,83	15,4	12,9
150,93	15,4	12,9
155,03	15,4	12,9
159,13	15,4	12,9
163,23	15,4	12,9
167,33	15,4	12,9
171,43	15,4	12,9
175,53	15,4	12,9
179,63	15,4	12,9
183,73	15,4	12,9
187,83	15,4	12,9
191,93	15,4	12,9
196,03	15,4	12,9
200,13	15,4	12,9
204,23	15,4	12,9
208,33	15,4	12,9
212,43	15,4	12,9
216,53	15,4	12,9
220,63	15,4	12,9
224,73	15,4	12,9
228,83	15,4	12,9
232,93	15,4	12,9
237,03	15,4	12,9
241,13	15,4	12,9
245,23	15,4	12,9
249,33	15,4	12,9
253,43	15,4	12,9
257,53	15,4	12,9
261,63	15,4	12,9
265,73	15,4	12,9
269,83	15,4	12,9
273,93	15,4	12,9
278,03	15,4	12,9
282,13	15,4	12,9
286,23	15,4	12,9
290,33	15,4	12,9
294,43	15,4	12,9
298,53	15,4	12,9
302,63	15,4	12,9
306,73	15,4	12,9
310,83	15,4	12,9
314,93	15,4	12,9
319,03	15,4	12,9
323,13	15,4	12,9
327,23	15,4	12,9
331,33	15,4	12,9
335,43	15,4	12,9
339,53	15,4	12,9
343,63	15,4	12,9
347,73	15,4	12,9
351,83	15,4	12,9
355,93	15,4	12,9
360,03	15,4	12,9
364,13	15,4	12,9
368,23	15,4	12,9
372,33	15,4	12,9
376,43	15,4	12,9
380,53	15,4	12,9
384,63	15,4	12,9
388,73	15,4	12,9
392,83	15,4	12,9
396,93	15,4	12,9
401,03	15,4	12,9
405,13	15,4	12,9
409,23	15,4	12,9
413,33	15,4	12,9
417,43	15,4	12,9
421,53	15,4	12,9
425,63	15,4	12,9
429,73	15,4	12,9
433,83	15,4	12,9
437,93	15,4	12,9
442,03	15,4	12,9
446,13	15,4	12,9
450,23	15,4	12,9
454,33	15,4	12,9
458,43	15,4	12,9
462,53	15,4	12,9
466,63	15,4	12,9
470,73	15,4	12,9
474,83	15,4	12,9
478,93	15,4	12,9
483,03	15,4	12,9
487,13	15,4	12,9
491,23	15,4	12,9
495,33	15,4	12,9
499,43	15,4	12,9
503,53	15,4	12,9
507,63	15,4	12,9
511,73	15,4	12,9
515,83	15,4	12,9
519,93	15,4	12,9
524,03	15,4	12,9
528,13	15,4	12,9
532,23	15,4	12,9
536,33	15,4	12,9
540,43	15,4	12,9
544,53	15,4	12,9
548,63	15,4	12,9
552,73	15,4	12,9
556,83	15,4	12,9
560,93	15,4	12,9
565,03	15,4	12,9
569,13	15,4	12,9
573,23	15,4	12,9
577,33	15,4	12,9
581,43	15,4	12,9
585,53	15,4	12,9
589,63	15,4	12,9
593,73	15,4	12,9
597,83	15,4	12,9
601,93	15,4	12,9
606,03	15,4	12,9
610,13	15,4	12,9
614,23	15,4	12,9
618,33	15,4	12,9
622,43	15,4	12,9
626,53	15,4	12,9
630,63	15,4	12,9
634,73	15,4	12,9
638,83	15,4	12,9
642,93	15,4	12,9
647,03	15,4	12,9
651,13	15,4	12,9
655,23	15,4	12,9
659,33	15,4	12,9
663,43	15,4	12,9
667,53	15,4	12,9
671,63	15,4	12,9
675,73	15,4	12,9
679,83	15,4	12,9
683,93	15,4	12,9
688,03	15,4	12,9
692,13	15,4	12,9
696,23	15,4	12,9
700,33	15,4	12,9
704,43	15,4	12,9
708,53	15,4	12,9
712,63	15,4	12,9
716,73	15,4	12,9
720,83	15,4	12,9
724,93	15,4	12,9
729,03	15,4	12,9
733,13	15,4	12,9
737,23	15,4	12,9
741,33	15,4	12,9
745,43	15,4	12,9
749,53	15,4	12,9
753,63	15,4	12,9
757,73	15,4	12,9
761,83	15,4	12,9
765,93	15,4	12,9
770,03	15,4	12,9
774,13	15,4	12,9
778,23	15,4	12,9
782,33	15,4	12,9
786,43	15,4	12,9
790,53	15,4	12,9
794,63	15,4	12,9
798,73	15,4	12,9
802,83	15,4	12,9
806,93	15,4	12,9
811,03	15,4	12,9
815,13	15,4	12,9
819,23	15,4	12,9
823,33	15,4	12,9
827,43	15,4	12,9
831,53	15,4	12,9
835,63	15,4	12,9
839,73	15,4	12,9
843,83	15,4	12,9
847,93	15,4	12,9
852,03	15,4	12,9
856,13	15,4	12,9
860,23	15,4	12,9
864,33	15,4	12,9
868,43	15,4	12,9
872,53	15,4	12,9
876,63	15,4	12,9
880,73	15,4	12,9
884,83	15,4	12,9
888,93	15,4	12,9
893,03	15,4	12,9
897,13	15,4	12,9
901,23	15,4	12,9
905,33	15,4	12,9
909,43	15,4	12,9
913,53	15,4	12,9
917,63	15,4	12,9
921,73	15,4	12,9
925,83	15,4	12,9
929,93	15,4	12,9
934,03	15,4	12,9
938,13	15,4	12,9
942,23	15,4	12,9
946,33	15,4	12,9
950,43	15,4	12,9
954,53	15,4	12,9
958,63	15,4	12,9
962,73	15,4	12,9
966,83	15,4	12,9
970,93	15,4	12,9
975,03	15,4	12,9
979,13	15,4	12,9
983,23	15,4	12,9
987,33	15,4	12,9
991,43	15,4	12,9
995,53	15,4	12,9
999,63	15,4	12,9

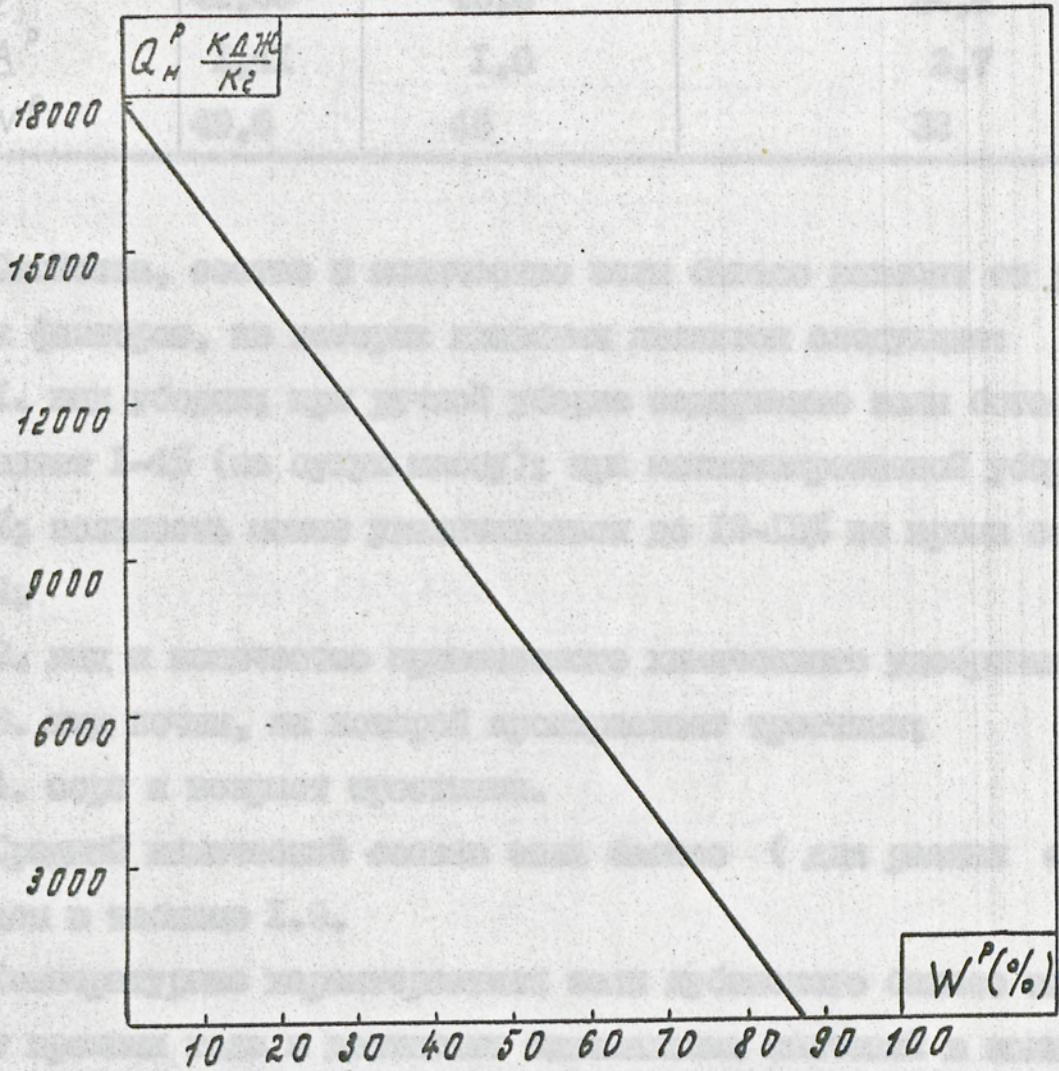


Рис. I.4. Изменение низшей теплоты сгорания в зависимости от влаги.

Таблица 1.8

Технический состав кубинского багассо и древесины

Компоненты	Содержание по массе, %		
	багассо	мягкая древесина / 14 /	древесина твердолист- венных пород / 14 /
K^P	7,49	12,4	12,9
V^P	41,50	40,6	52,4
A^P	1,41	1,0	2,7
W^P	49,6	46	32

Свойства, состав и количество золь багассо зависят от различных факторов, из которых главными являются следующие:

1. вид уборки; при ручной уборке содержание золь багассо составляет 1-4% (на сухую массу); при механизированной уборке - 5-8%; зольность может увеличиваться до 12-15% во время сезона дождей;

2. вид и количество применяемого химического удобрения;

3. вид почвы, на которой произрастает тростник;

4. сорт и возраст тростника.

Средний химический состав золь багассо (для разных стран) приведен в таблице 1.9.

Температурные характеристики золь кубинского багассо зависят от времени года и достигают минимальных значений в конце апреля и начале мая, когда на Кубе, наступает сезон дождей и, следовательно, количество посторонних веществ в тростнике увеличивается (рис. 1.5).

Оксиды натрия и калия в золь багассо резко уменьшают температуру плавления золь /19/. По рис. 1.5 видно, что при увеличе-

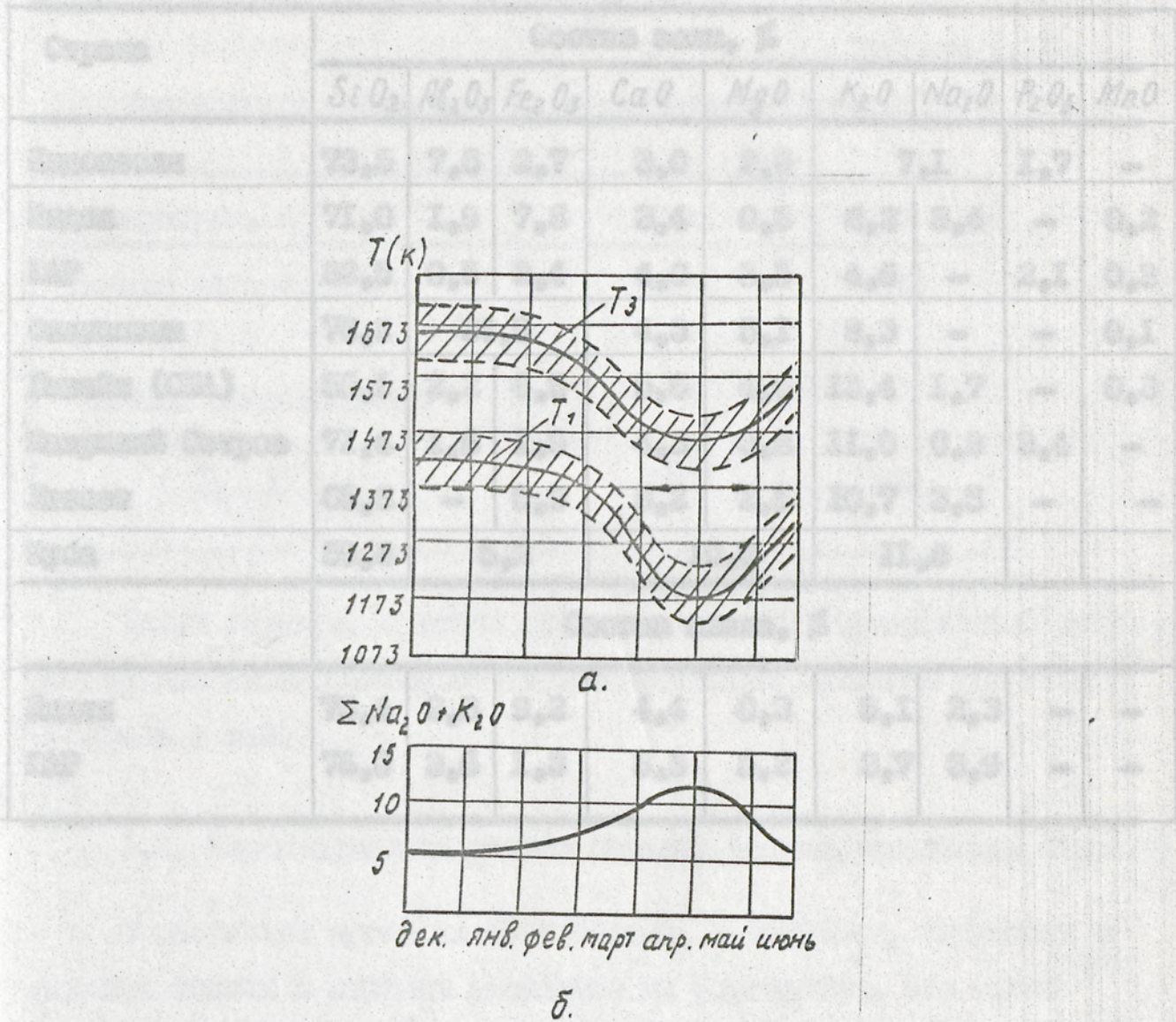


Рис. I.5. Изменение температурных характеристик зола (а) и комплекс $\Sigma Na_2O + K_2O$ (б) для Кубинского багасо от времени года.

Средний химический состав золы и шлака багассы разных стран / II, IV /

Страна	Состав золы, %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	MnO
Индонезия	73,5	7,6	2,7	3,0	2,6	7,1	1,7	-	-
Индия	71,0	1,9	7,8	3,4	0,3	8,2	3,4	-	0,2
БАР	82,5	0,5	2,4	4,0	3,5	4,6	-	2,1	0,3
Эфиопия	76,8	24,0	-	4,3	5,1	8,3	-	-	0,1
Гавайи (США)	56,1	2,2	6,5	5,6	4,6	13,4	1,7	-	0,3
Маврикий Остров	71,4	1,6	1,9	4,3	3,8	11,0	0,8	3,4	-
Египет	65,8	-	0,9	8,2	2,5	10,7	3,3	-	-
Куба	59,8	5,2	-	10,0	-	11,8	-	-	-
Состав шлака, %									
Индия	75,4	2,3	9,2	4,4	0,3	5,1	2,3	-	-
БАР	76,0	3,6	1,3	3,5	5,2	3,7	3,9	-	-

нии содержания $Na_2O + K_2O$ в золе от 5% до 12% температура начала деформации золи уменьшает от 1423 К до 1173 К.

В табл. I.10 приведены средние значения температурных характеристик золи кубинского багассо /18/.

Таблица I.10

Температура плавления золи кубинского багассо /18/

Температура, К	1968	1973
Начало деформации (T_1)	1173	1173
Начало жидкоплавного состояния (T_3)	1573	1553

Таким образом, с точки зрения шлакования поверхностей нагрева паровых котлов наиболее неблагоприятными являются два месяца - апрель и май.

1.3. Характеристики работы паровых котлов, сжигающих багассо

В настоящее время на Кубе багассо, в основном, сжигается в слоевых топках в широком диапазоне их форсировок. Эти топки имеют следующие преимущества /20/ :

1. простоту управления;
2. возможность безболезненно переносить небольшие перерывы в подаче топлива;
3. возможность работы при значительных колебаниях нагрузки и влагосодержания багассо.

Существуют различные варианты словесных топок для сжигания багассо. Их можно разделить на две группы:

1. топки для сжигания багассо в куче;
2. топки с решетками.

Топки для сжигания багассо в куче до сих пор широко используются в сахарной промышленности. Наиболее распространенным вариантом таких топок является топка фирмы "Мартин" (рис. 1.6), которая используется почти на всех сахарных заводах Кубы. В такой топке в центре камеры на полу образуется куча багассо. В топку камеру вентиляторами подается воздух через сопла, расположенные на разной высоте камеры и тангенциально к поверхности кучи багассо. Количество сопел в нижних рядах больше, т.е. в этой зоне находится большее количество топлива. Зола удаляется из камеры вручную.

Боросредняя поперечного сечения этой топки составляет 2100-2250 $\frac{м^2}{ч}$ при сжигании багассо с влажностью $W^p = 50\%$; в условиях пиковой нагрузки - до 2900 $\frac{м^2}{ч}$. Топка работает с низким коэффициентом избытка воздуха ($\alpha_t > 1,6$) и низким КПД, brutto 55-60%. Ручное удаление золы так не является ее существенным недостатком.

С 1968 по 1980 год на сахарных заводах Кубы были установлены 130 котлов немецкого производства, в которых багассо сжигается в куче (рис. 1.7). Работа этих котлов характеризуется низким коэффициентом полезного действия, низкой паропроизводительностью на единицу поверхности нагрева, частыми разрушениями труб поверхностей нагрева потолка топки, невозможностью достигнуть номинальной нагрузки /22/.

В 1981 году была проведена реконструкция одного котла этого

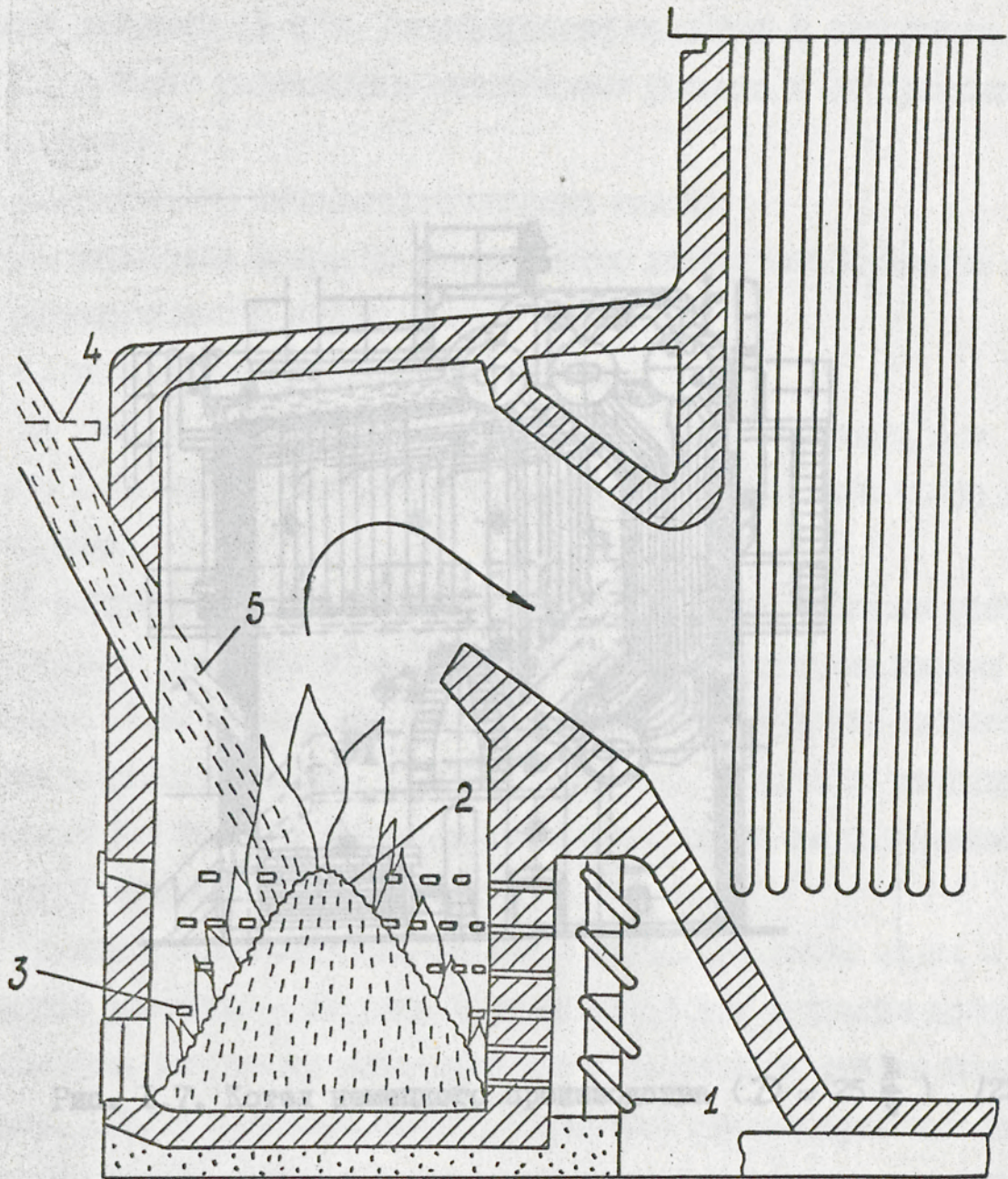


Рис.1.6. Топка для сжигания багасо в куче /2I/.

I - заслонки

2 - куча багасо

3 - воздушные сопла

4 - грабильный транспортер

5 - падающее багасо.

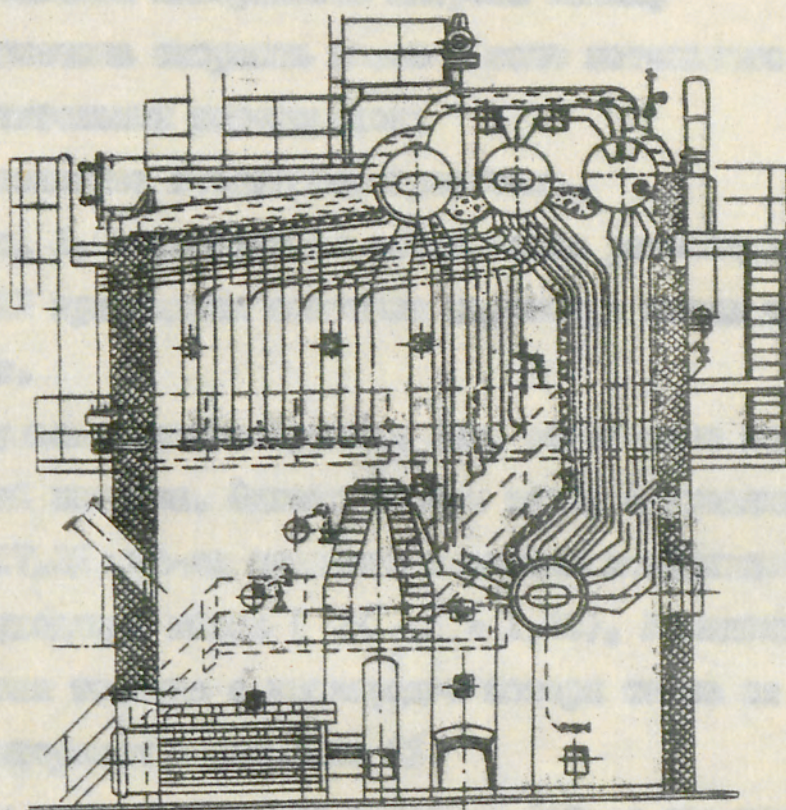


Рис. I.7. Котел немецкого производства ($D = 25 \frac{1}{4}$) /22/

типа на сахарном заводе "Перу" в провинции "Лас Тунас", с целью увеличения коэффициента полезного действия и достижения номинальной нагрузки 45 т/ч. Реконструкция состояла в следующем:

1. в топке установлена неподвижная решетка с поворотными колосниками;
2. увеличена поверхность нагрева топки;
3. увеличена скорость газов в зоне котельного пучка за счет дополнительных перегородок;
4. установлен воздухоподогреватель.

На рис. 1.8 представлен котел после реконструкции, а в таблице 1.11 приводятся основные параметры котла до и после реконструкции.

В результате реконструкции была обеспечена надежная работа поверхностей нагрева. Однако потери тепла с уходящими газами достигали 17,3%, и из-за высокого значения коэффициента избытка воздуха в уходящих газах ($\alpha_{yx} = 1,82$). Вследствие неполного перемешивания топлива с кислородом потеря тепла от химической неполноты сгорания составляла 2%.

Другим типом топок для сжигания багассо является топка с наклонной решеткой — по типу финских топок для сжигания древесных отходов. Эти топки имеют решетки с различными углами наклона (рис. 1.9) в пределах 20-65°. Первичный воздух проходит через слой багассо, которое перемещается под действием силы веса по решетке в виде тонкого слоя. Эти топки работают с более низким коэффициентом избытка воздуха ($\alpha_T'' = 1,3$) и более высоким КПД (около 70%) по сравнению с топками для сжигания багассо в куче. Однако эти топки очень чувствительны к изменению нагрузки. При частичных нагрузках на решетке могут появляться зоны, свободные от топлива в результате чего повышается избыток воздуха

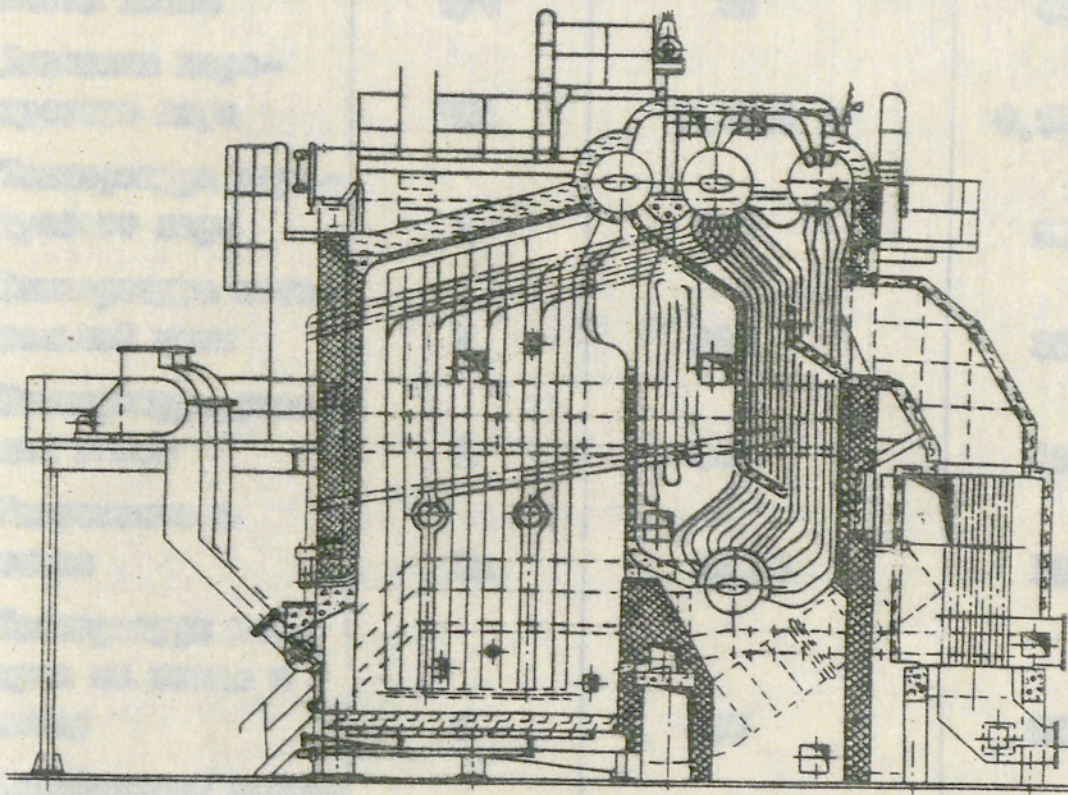


Рис. I.8. Чемецкий котел после реконструкции ($D=45 \frac{7}{8}$)

/22/

Таблица I.II

Основные характеристики котла до и после реконструкции / 22 /

Характеристики	Размерность	До реконструкции	После реконструкции
Производительность котла	т/ч	35	45
Давление перегретого пара	МПа	0,9306	0,9120
Температура перегретого пара	К	513	646
Температура питательной воды	К	369	353
Температура уходящих газов	К	656	496
Разрежение в топке	Па	22,55	16,67
Температура воздуха на входе в топку	К	307	523
Коэффициент полезного действия (нетто)	%	53	76

Рис. I.3. Топка с наклонной решеткой /21/.

1 - решетка; 2 - воздушные сопла; 3 - слой багассо;

4 - вход вторичного воздуха; 5 - грабильный транспортер.

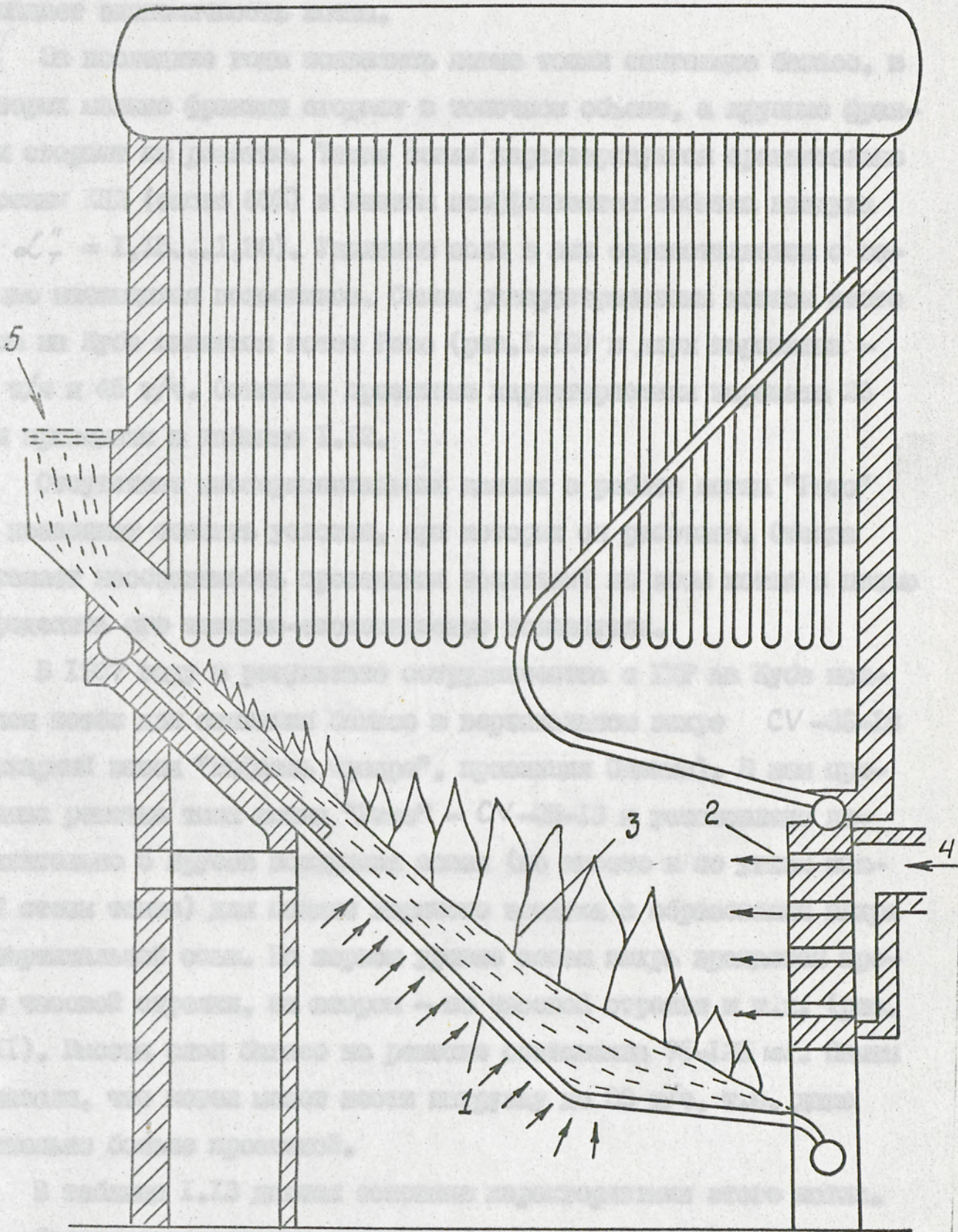


Рис. I.9. Топка с наклонной решеткой /2I/.

I - решетка; 2 - воздушные сопла; 3 - слой багасо;

4 - вход вторичного воздуха; 5 - грабильный транспортер.

и падает экономичность котла.

За последние годы появились новые тонны скитанные багасо, в которых мелкие фракции сгорают в точном объеме, а крупные фракции сгорают на решетке. Такие тонны характеризуются сравнительно высоким КПД (около 80%) и низким коэффициентом избытка воздуха ($\alpha'' = 1,15...1,30$). Удаление золы в них осуществляется с помощью качающихся полосников. Самым распространенным котлом этого типа на Кубе является котел Рето (рис. I.10) в двух вариантах - 25 т/ч и 45 т/ч. Основные проектные характеристики варианта 25 т/ч приведены в таблице I.12.

Отсутствие экспериментальных данных о работе котла "Рето" не позволяет оценить условия, при которых он работает. Отсюда вытекает необходимость проведения испытаний на этом котле с целью определить его технико-экономические показатели.

В 1987 году в результате сотрудничества с ГИР на Кубе появился котел для скитания багасо в вертикальном вихре CV-36-18 (сахарный завод "Рафаэль Фрейре", провинция Ольгин). В нем применена решетка типа котла "Рето" - CV-25-18 и установлено дополнительно 5 ярусов воздушных сопел (по высоте и по углам каждой стены топки) для подачи горячего воздуха и образования вихря с вертикальной осью. На первом уровне сопел вихрь вращается против часовой стрелки, на втором - по часовой стрелке и т.д. (рис. I.11). Высота слоя багасо на решетке составляла 75-125 мм. Опыт показал, что котел может нести нагрузку до 39 т/ч, т.е. даже несколько больше проектной.

В таблице I.13 даны основные характеристики этого котла.

Основные недостатки скитания багасо в слое заключаются в следующем:

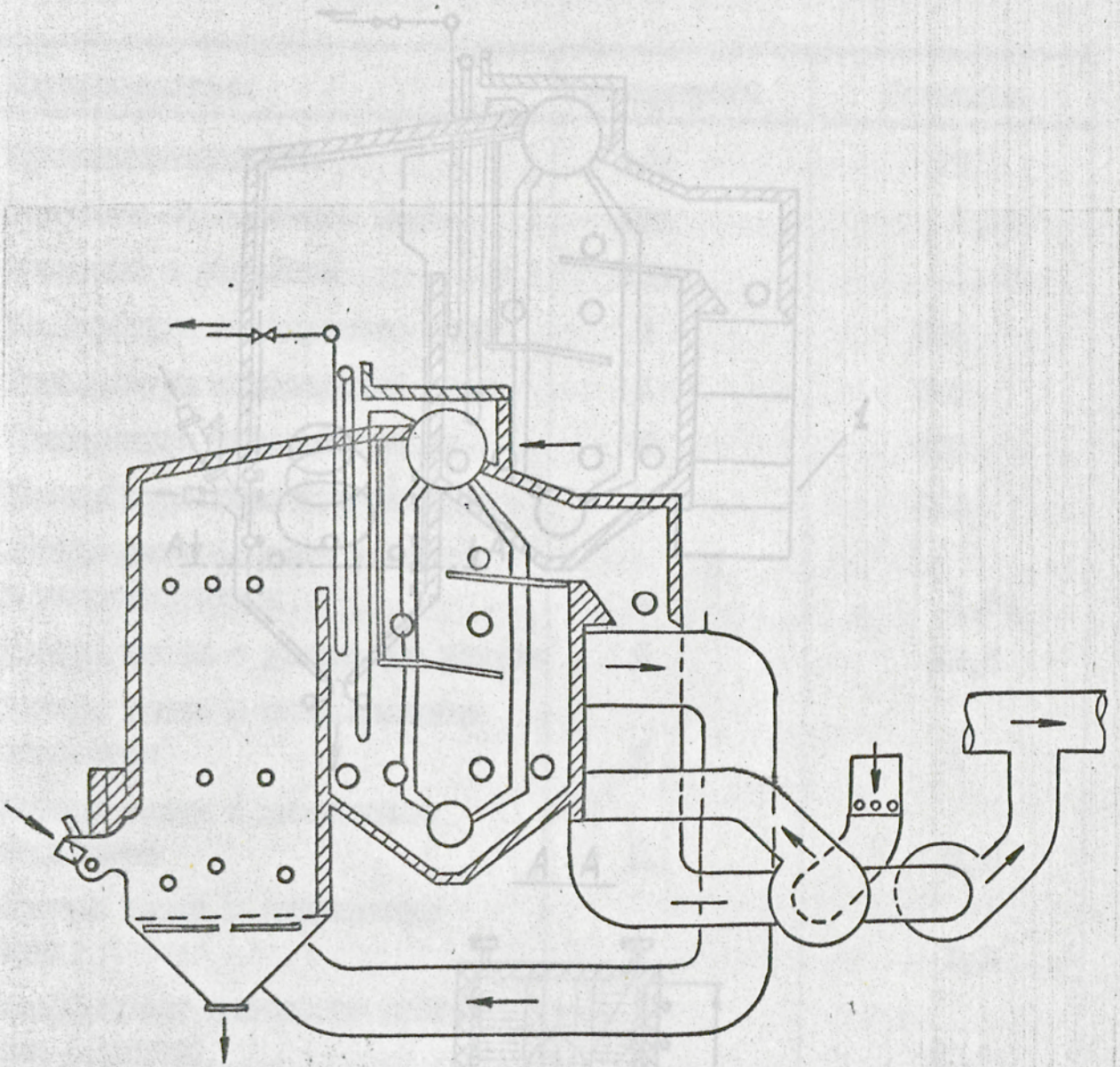
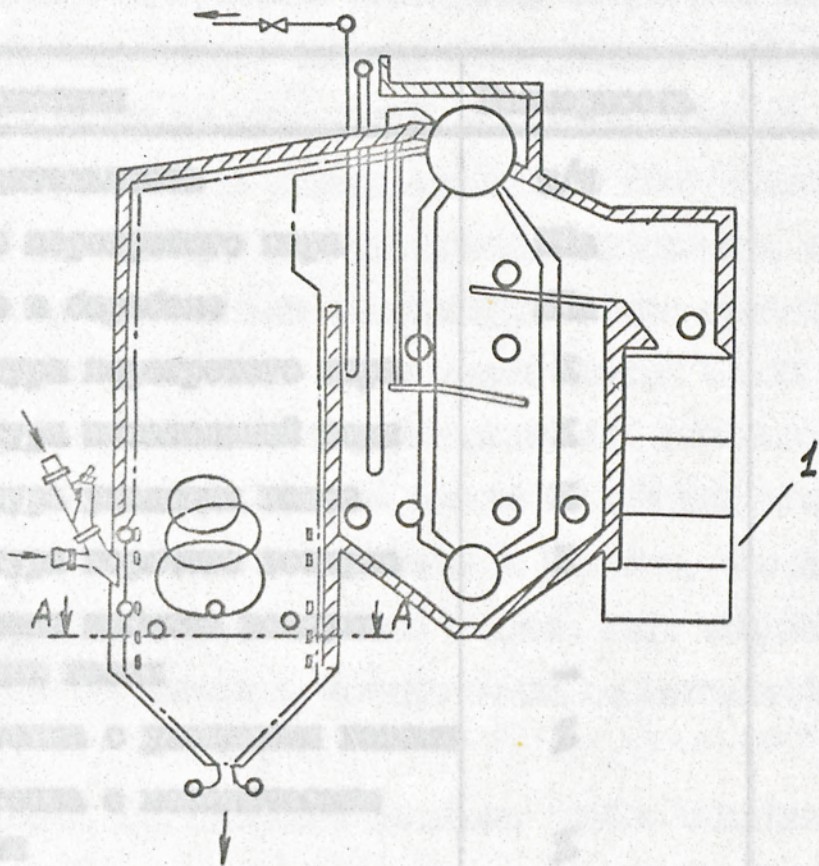


Рис. I.10. Котел с решеткой "Рето" (CV-25-18).

Рис. I.11. Котел вертикального вихря CV-36-18.
1 - воздухоподогреватель.

Рис. I. II

CV-36-18



A - A

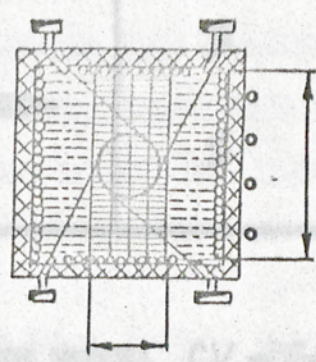


Рис. I. II. Котел вертикального вихря CV-36-18.

I -воздухоподогреватель.

1,70

5

413

1

Таблица I.12

Основные проектные характеристики котла "Рето" CV-35-18

Характеристики	Размерность	Величина
Производительность	т/ч	25
Давление перегретого пара	МПа	1,76
Давление в барабанах	МПа	1,66
Температура перегретого пара	К	593
Температура питательной воды	К	363
Температура уходящих газов	К	472
Температура горячего воздуха	К	492
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	-	1,54
Потери тепла с уходящими газами	%	13,4
Потери тепла с механическим подсосом	%	4
Потери тепла с химическим подсосом	%	0,5
Потери тепла в окружающую среду	%	1,2
Коэффициент полезного дейст- вия (брутто)	%	80,9

Таблица I.13

Основные характеристики котла CV-36-18

Характеристики	Размерность	Величина
Производительность	т/ч	36
Давление перегретого пара	МПа	1,76
Температура перегретого пара	К	593
Температура уходящих газов	К	413

1. при большой высоте слоя в нем могут появляться зоны с недостаточным содержанием кислорода, возрастает количество окиси углерода над слоем, что при эксплуатации приводит к увеличению потерь тепла от химической неполноты сгорания (q_3) / 22 %;

2. необходимость работы с высокими коэффициентами избытка воздуха ($\alpha = 1,5-1,6$) для уменьшения химического и механического недожога; это снижает температуру в зоне горения, ухудшает теплоотдачу в этой зоне, увеличивает потери тепла с уходящими газами и, в конечном итоге, уменьшает КПД агрегата;

3. для котлов мощностью больше 50 т/ч возрастает неравномерность раздачи топлива по слое на решетке, что вызывает кратерный характер горения bagasse в слое, унос мелких частиц дымовыми газами и увеличение потерь тепла от механической неполноты сгорания ($q_4 \approx 4\%$);

4. топлив для слоевого сжигания bagasse обладают высокой термической инерцией, она затрудняет автоматическое регулирование самого котла.

Котлы, которые в настоящее время используют bagasse как топливо, удовлетворяют практически все энергетические потребности сахарной промышленности, однако характеристики слоевой системы сжигания bagasse не позволяют повысить мощности и КПД этих котлов.

1.4. Сжигание натурального bagasse в паровых котлах большой мощности в других странах

Использование паровых котлов с высокими параметрами пара для сжигания bagasse является весьма эффективным вариантом и предоставляет большие перспективы для решения энергетических

проблем стран, таких как Куба, производящих сахар и не имеющих других энергетических ресурсов.

Как было отмечено ранее, кубинская энергетическая политика в перспективе предусматривает широкое использование паровых котлов сахарной промышленности для получения электроэнергии. Очевидно, что тонны, в которых сейчас скитается багасо, не могут решить этой задачи по многим причинам:

1. параметры пара котлов, которые используются сейчас, отвечают специфическим требованиям производства сахара, но недостаточны для экономичного производства электроэнергии; для этого необходимо установить котлы с более высоким давлением и температурой пара с соответствующим увеличением количества производимого пара на тонну сожженного багасо;

2. паровые турбины, которые установлены в сахарной промышленности, спроектированы так, что без больших трудностей могут переносить относительно большие отклонения в параметрах пара. Это является следствием того, что котлы на сахарных заводах управляются обычно вручную, без достаточных контролирующих приборов, а главным показателем их работы является давление пара, которое поддерживается в заданных пределах изменением количества багасо и воздуха, подаваемых в топку. Известно, что производство пара высоких параметров для выработки электроэнергии ставит жесткие ограничения по отклонениям параметров пара от нормальных значений;

3. традиционные котлы в сахарной промышленности характеризуются большой тепловой инерцией, связанной, в основном, с количеством багасо, которое находится в топке, и водяным объемом котла. Таким образом, уменьшение паровой нагрузки влечет за со-

бой увеличение давления пара в барабане, даже если оператор уменьшает подачу блага и воздуха в топку. Эта большая термическая инерция не позволяет использовать эффективным образом автоматическое регулирование, которое должно поддерживать параметры пара в допустимых пределах при изменении нагрузки.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что необходимо использовать другие схемы сжигания блага. В этом смысле системы горения во взвешенном состоянии имеют большое преимущество. В таких топках блага не аккумулируется в топке; нет нагретых стен, которые аккумулируют тепло. Горение блага во взвешенном состоянии в сочетании с переменными режимами топки позволяет иметь высокий КПД топки, надежность и быстро реагировать на изменение нагрузки, удерживая параметры пара в установленных границах. Существует различие варианты топок с горением топлива во взвешенном состоянии:

1. топки с прылочным фанелом;
2. топки с вертикальным выкром;
3. топки с горизонтальным низкотемпературным выкром (НВ);
4. топки с зигзагообразным движением газов;
5. топки с кипящим слоем (КС).

Рассмотрим преимущества и недостатки каждого из вариантов топок сжигания блага во взвешенном состоянии.

При сжигании топлива в прылочном фанеле, дотормане крупных частиц (например, прессованных частиц блага) происходит в зоне относительно малых концентраций кислорода (менее 5%) / 23/. Это приводит к необходимости или увеличивать размеры топки, или — топить полая топлива. Валостные тонкого излома топлива и интенсивного его стороны образуется зона низких температур в

ядре факела, что приводит к расплавлению зола. Частицы багассы покрываются липким слоем зола и не успевают сгореть в пределах топочной камеры, что приводит к росту механического надомета. Кроме этого, наблюдается сильное загрязнение конвективных поверхностей нагрева. Из-за высокой температуры в зоне ядра факела образуется большое количество оксидов азота.

При увеличении содержания влаги в багассе наблюдается увеличение потерь тепла от механической неполноты сгорания. В некоторых случаях из-за большого содержания влаги в багассе процесс воспламенения может быть недостаточно устойчивым, т.к. тонна имеет малую термическую инерцию /24/.

Одним из преимуществ сжигания багассы во взвешенном состоянии является хорошее смешение топлива с воздухом и возможность работать с низкими коэффициентами избытка воздуха при относительно малом образовании окиси углерода, т.е. при небольшой потере тепла от химической неполноты сгорания по сравнению со слоевыми сжиганием. На рис. I.12 представлена схема тонны для сжигания багассы в проточном факеле.

Информация о тоннах сжигания багассы, в вертикальном вихре, очень мало. На Кубе проведена реконструкция одного котла на этот тип тонны (рис. I.11) и проведены первые пуски. В настоящее время отсутствуют данные о величине потерь тепла, коэффициента полезного действия и т.д. для этой тонны. По-видимому, эта тонна окажется недостаточно универсальна по топливу и могут возникнуть трудности в эксплуатации при изменении влажности или гранулометрического состава багассы.

Очень перспективной для сжигания багассы во взвешенном состоянии является тонна с ИТВ (низко температурным вихрем) системы

ЛИИ (рис. I.13). В этих топках удается эффективно сжигать высоко-
влагнистые низкосортные топлива с размером частиц до 30 мм. Таким
образом, в этих топках, по-видимому, можно сжигать прессованные
частицы багассо без предварительного их размола. В топках с ИТВ
за счет взаимодействия двух воздушных потоков в холодной ворон-
ке образуется устойчивая циркуляция газов и топлива, которая
обеспечивает надежное воспламенение высоковлажного топлива,
поступающего в топку.

За счет углубления покла топлива и организации вихревой
зоны факела горение частиц топлива растягивается по всему объе-
му топочной камеры, что приводит к общему снижению температур
факела на 150-200 К. При этом зола топлива не расплавляется. Кро-
ме того, происходит резкое снижение значений тепловых потоков в
топке и на 30-50% уменьшается образование оксидов азота [25].

В литературе практически нет информации о топках для сжи-
гания багассо в факеле с зигзагообразным движением газов. В этой
топке на фронтальной и задней стенах на разных уровнях располо-
гаются несколько рядов сопел. Такое расположение сопел приво-
дит к зигзагообразному движению частиц багассо, благодаря чему
их время пребывания в топке увеличивается. В настоящее время
на Кубе проектируется котел этого типа (рис. I.14); в табл. I.14
приводятся основные проектные характеристики этого котла. Оце-
нить реальные показатели этого котла пока невозможно.

Таблица I.14

Основные проектные характеристики котла CV-60-30

Характеристики	Единица	Величина
Паропроизводительность	т/ч	60
Давление в барабане	МПа	3,24
Давление перегретого пара	МПа	2,94
Температура перегретого пара	К	686
Температура уходящих газов	К	396
Коэффициент полезного действия (брутто)	%	86



Рис. I. I2. Топка для сжигания багасо в прямоточном факеле / 24 /.

I — зона воспламенения

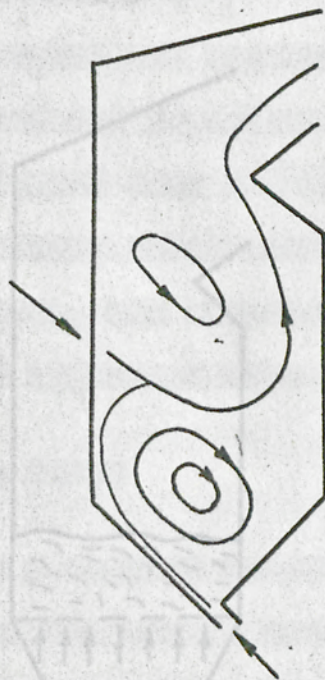


Рис. I. I3. Топка с горизонтальным низкотемпературным вихрем (НТВ).

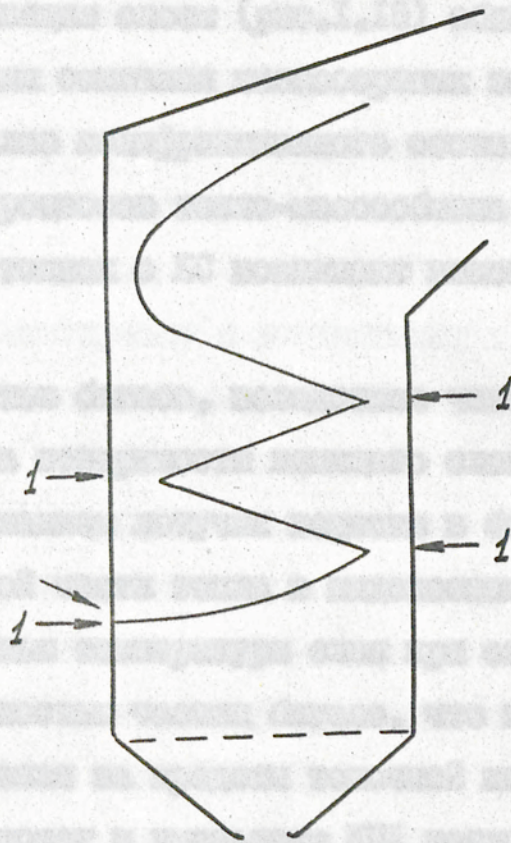


Рис. I. I4. Топка с зигзагообразным движением газов.
I - воздушные сопла.

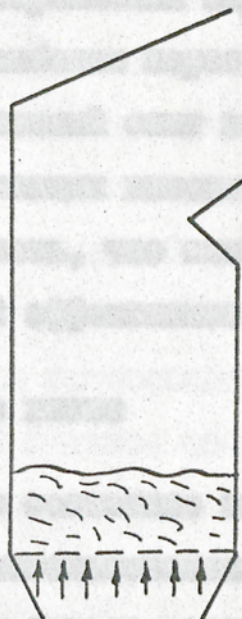


Рис. I. I5. Топка с кипящим слоем.

Топки с кипящим слоем (рис. I.15) обладают благоприятными возможностями для сжигания низкосортных забалластированных влажной и золой топлив полифракционного состава вследствие высокой интенсивности процессов тепло-массообмена в КС. Однако при сжигании багассы в топках с КС возникают некоторые трудности, вытекающие:

- малой плотностью багассы, вследствие чего частицы багассы будут налипать на поверхности кипящего слоя;
- большим содержанием летучих веществ в багассе, что приводит к выделению большой части тепла в надслоевом пространстве топки;
- неравномерностью температуры слоя при сжигании багассы;
- высокой пористостью частиц багассы, что приводит к их интенсивному выносу из слоя за пределы топочной камеры, что увеличивает механический недогар и уменьшает КПД котла.

Поэтому топки с КС не получили широкого распространения в энергетике сахарных заводов.

Из всех рассматриваемых вариантов сжигания багассы во взвешенном состоянии наиболее перспективной является топка с ИТВ системы ДИИ. Накопленный опыт в СССР по использованию этой системы в котлах, сжигающих высоковолажные отходы промышленности, позволяет предполагать, что сжигание багассы в этой топке будет проходить с высокой эффективностью.

I.5. Выводы по главе

I. Современное состояние энергетики Республики Куба требует более широкого использования отечественных источников энергии. С этой точки зрения багасса занимает первоочередное место как экологически возобновляющееся дешевое топливо. Оно также может служить сырьем для других отраслей промышленности. Внедрение про-

прессов сушки и прессовании багассо и применение его для сжигания в мощных котлах с высокими параметрами пара и с высоким КПД имеет большие перспективы для дальнейшего развития кубинской энергетики и может уменьшить ее зависимость от дорогого привозного жидкого топлива.

2. По элементарному и химическому составу багассо довольно близок к составу древесины, и характеризуется высоким содержанием влаги ($W^p = 50,2\%$) и летучих ($V^p = 42,5\%$) и низким содержанием золы ($A^p = 2,0,5\%$). Содержание Na_2O и K_2O золы багассо зависит от времени года и варьирует в пределах 5-12%, что вызывает уменьшение температуры начала деформации T_1 от 1423 К до 1173 К и температуры начала жидкоплавленного состояния T_3 от 1670 К до 1470 К.

3. В настоящее время на Кубе багассо сжигается в слоевых топках, которые имеют высокие коэффициенты избытка воздуха и низкие КПД. Параметры пара таких котлов также низки - 1-1,76 МПа и 500-646 К. Характеристиками слоевой системы горения не позволяет повысить мощность, КПД и параметры пара котлов, сжигания багассо. Отсюда вытекает необходимость перехода к сжиганию багассо во взвешенном состоянии.

4. Очень перспективной для сжигания багассо во взвешенном состоянии является топка с ПТВ системой ЛПМ. В этой топке можно сжигать подсушенные прессованные частицы багассо без предварительного разлома и влажное натуральное багассо при отсутствии шлакования и с высоким КПД.

5. Отсутствие экспериментальных и теоретических данных о процессе горения натурального багассо во взвешенном состоянии в условиях, близких к топкам паровых котлов, вызывает необходимость научения вопроса о горении частиц натурального багассо.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ

КОТЛА "РЕТО" (CV -25-18)

2.1. Методы испытаний

2.1.1. Методика определения теплового баланса котла

Тепловой баланс котельной установки составляется для определения экономических показателей работы котла. Определение КПД котлоагрегата будем проводить методом обратного баланса:

$$\eta_{\text{кп}}^{\text{бр}} = 100 - \sum_{i=2}^6 q_i, \quad \% \quad (2.1)$$

Потери тепла с уходящими газами (q_2) определяется как разность энтальпий продуктов сгорания на выходе из котельного агрегата и холодного воздуха;

$$q_2 = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} I_{xb}^{\circ})(100 - q_4)}{Q_p}, \quad \% \quad (2.2)$$

где I_{yx} - энтальпия уходящих газов при соответствующих избытке воздуха (α_{yx}) и температуре (t_{yx}), $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

I_{xb}° - энтальпия холодного воздуха, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

q_4 - потеря от механической неполноты сгорания, %;

Q_p - располагаемое количество тепла, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

При сжигании молодых топлив со значительным содержанием летучих, например багассо, в продуктах горения могут присутствовать газообразные горючие компоненты: CO , H_2 , CH_4 . Теплота, потерянная в результате недогорания этих горючих газов, составляет потерю теплоты с химическим недогором топлива (q_3):

$$q_3 = (30,18 \text{CO} + 85,55 \text{CH}_4 + 25,79 \text{H}_2) \frac{V_{\text{сг}}}{Q_p}, \quad \% \quad (2.3)$$

где $V_{сг}$ — объем сухих газов, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Величины CO , H_2 и CH_4 определяются полным газовым анализом на хроматографе. Отбор пробы газов тщательно проводить в газоходе, расположенном ближе к топке, во избежание снижения концентрации горючих газов из-за присосов воздуха.

Потери тепла от механической неполноты сгорания (q_4) представляет собой недогоревшее топливо в шлаке, провале и золе, выпадающей в бункера газоходов и золоуловителей, а также в уносе летучей золой.

Потери от механического недожога могут быть подсчитаны через баланс зола топлива:

$$BA^P = B_{ш}A_{ш} + B_{зл}A_{зл} + B_{ун}A_{ун}, \quad (2.4)$$

где $A_{ш}$, $A_{зл}$, $A_{ун}$ — процентные содержания зола в шлаке, в золе из воронок газоходов и в уносе;

B , $B_{ш}$, $B_{зл}$, $B_{ун}$ — часовые расходы топлива, шлака, зола и уноса, $\text{кг}/\text{ч}$;

или

$$1 = \frac{B_{ш}A_{ш}}{BA^P} + \frac{B_{зл}A_{зл}}{BA^P} + \frac{B_{ун}A_{ун}}{BA^P}, \quad (2.5)$$

или в %

$$100 = a_{ш} + a_{зл} + a_{ун}, \quad (2.6)$$

где $a_{ш}$, $a_{зл}$, $a_{ун}$ — доли зола топлива в шлаке, в золе из воронок газоходов и в уносе, %.

Тогда

$$q_4 = \left(a_{ш} \frac{C_{ш}}{100 - C_{ш}} + a_{зл} \frac{C_{зл}}{100 - C_{зл}} + a_{ун} \frac{C_{ун}}{100 - C_{ун}} \right) \frac{3278 A^P}{Q_P} \%, \quad (2.7)$$

где $C_{ш}$, $C_{зл}$, $C_{ун}$ — содержание горючих в шлаке, золе и уносе %.

Определение потери тепла в окружающую среду (q_5) путем непосредственного изморозения тепловых потоков с внешней поверх-

ности является очень трудной задачей и поэтому при испытаниях котельных агрегатов значение q_5 принимается по нормативным графикам /26/.

Потери тепла с физическим теплом влаги или зола (q_6) определяются по формуле:

$$q_6 = \frac{A^p \alpha_w c_w t_w}{Q_p}, \% , \quad (2.8)$$

где c_w, t_w — теплоемкость и температура влаги.

При выполнении теплового баланса котла необходимо осуществлять следующие мероприятия:

1. проверка эксплуатационных и экспериментальных приборов;
2. очистка поверхностей нагрева (котельных пучков и пароперегревателей);
3. осмотр всех лючков, систем подачи топлива, питательной воды, воздуха, а также вспомогательного оборудования;
4. проверка водно-химического режима котла и принятие необходимых мер во избежание продувки котла во время опыта;
5. осуществление очистки решетки, удаление зола из бункеров, расположенных в зоне котельного пучка;
6. в течение 3 часов перед началом опыта поддержание нагрузки, при которой предполагается проведение опыта с отклонением не более $\pm 3\%$.

При испытании показатели работы котлоагрегата могут меняться в определенных пределах и в табл. 2.1 приводятся их допустимые отклонения для котлоагрегата Рето CV-25-18.

После начала опыта наблюдатели (всего было приглашено 7 человек) снимали показания приборов каждые 5 мин. В табл. 2.2 приводятся основные измерения, которые были организованы при проведении испытаний. Отборы проб топлива осуществляли каждые 20-30

минут. Теплота сгорания багассо была определена экспериментальным путем и по эмпирической формуле I.2. Измерение основных параметров пара и воды осуществлялось эксплуатационными предварительно проверенными приборами. Погрешность при измерении расходов перегретого пара и питательной воды для наших условий составляли соответственно 16% и 27%, а при измерении температур и давления 3% и 2,7% соответственно.

Отборы проб газов проводились с интервалом 20-30 минут газоотборной трубкой с водяным охлаждением (рис.2.1). Для определения концентрации компонентов газов использовался аппарат типа ОРСа (для определения RO_2 и O_2) и хроматограф "Тазохром-3101" (для определения CH_4 , CO , H_2) (см.разд. 2.1.3).

Таблица 2.1

Допустимые отклонения показателей работы котла
при испытании

Параметры	Максимально допустимое отклонение значения параметра в лопите
Паропроизводительность	$\pm 15\%$
Температура перегретого пара	$\pm 10\text{ K}$
Избыток воздуха за перегревателем	$\pm 4-5\%$
Температура питательной воды, горячего воздуха	$\pm 3\%$

Относительная погрешность при анализе газов на хроматографе составляла $\pm 5\%$, на аппарате "Орса" - $\pm 3,2\%$ для определения концентрации RO_2 и $\pm 3,6\%$ - для кислорода. Эталонный газ для калибровки хроматографа перед каждым анализом был приведен

Таблица 2.2

Основные измерения при проведении теплового баланса котлов, сжигающих bagaso

	Наименование анализа, измерения	Метод определения
Топливо	Теплота сгорания (Q_H^P), содержание влаги (W^P), зола (A^P) и фракционный состав bagaso	По ГОСТ
	Температура bagaso Содержание сахара в bagaso	ртутным термометром поляриметром
Пар	- расход, давление и температура перегретого пара - давление в барабане	Эксплуатационными приборами
Вода	расход, температура и давление питательной воды	Эксплуатационными приборами
Дымовые газы	Состав газов (RO_2 , O_2 , CO , H_2 , CH_4) на выходе из топки и за воздухоподогревателем	Газоанализатором Орса и хроматографом
	Температура за воздухоподогревателем	Эксплуатационным прибором
Воздух	Влагосодержание и температура воздуха перед дутьевым вентилятором	Психрометром, ртутным термометром
Очаговые остатки	Содержание горючих в шлаке, золе и в уносе.	По ГОСТ
	Расходы шлака и золы	взвешиванием остатков
	Температура шлака	Термопарой

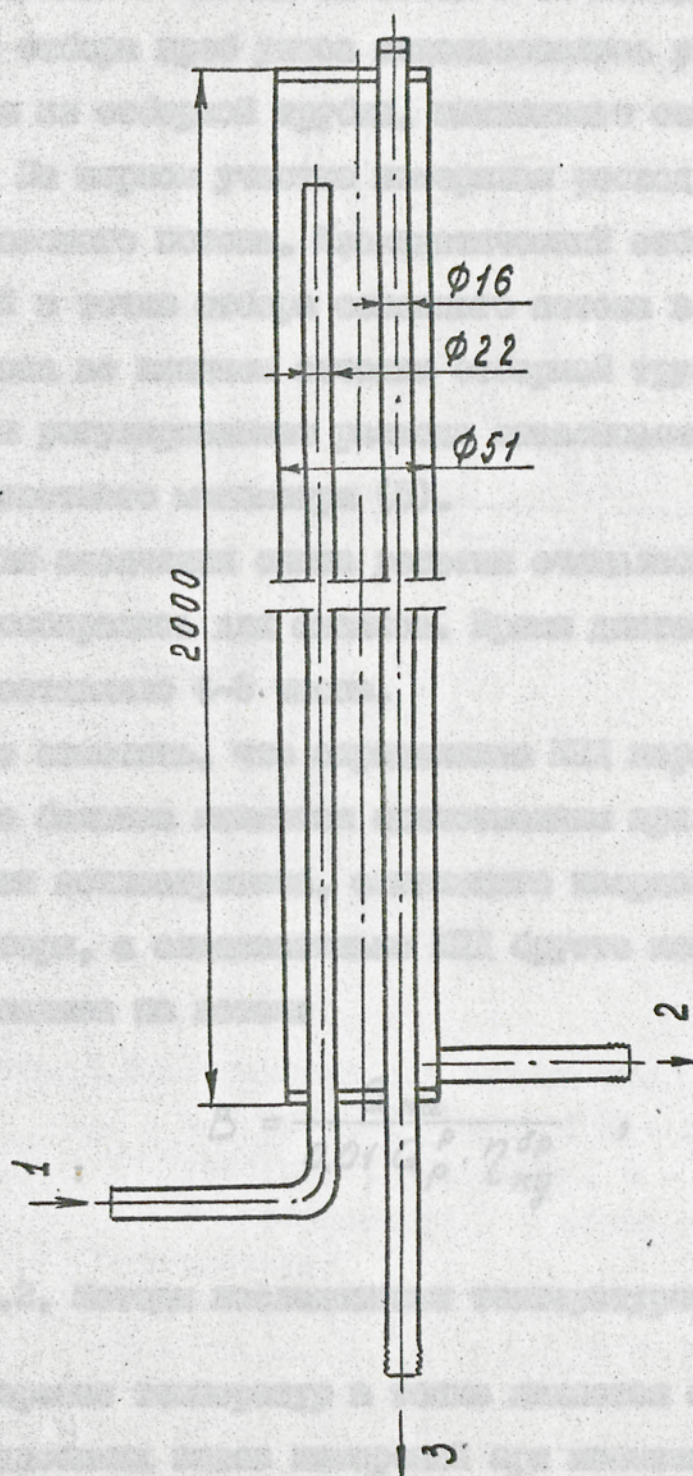


Рис. 2.1. Газообразная трубка с водяным охлаждением.
1, 2 - вход и выход воды; 3 - газ к прибору.

на Кубу с кафедры РИПС Ленинградского политехнического института.

Учитывая возможность догорания коксовых частиц в газоходах котлоагрегата (визуально наблюдаются раскаленные частицы в зоне пароперегревателя и котельного пучка), анализ газов был проведен в двух точках на выходе из топки и за воздухоподогревателем.

Для отбора проб уноса использовались установка (рис. 2.2), состоящая из отборной трубы, цинкового сепаратора и мерного участка. На мерном участке измерялся расход и температура отводящего газового потока. Исключительный отбор проб — равенство скоростей в точке отбора основного потока в газоходе и отводящего потока во входном сечении отборной трубы (рис. 2.3) — обеспечивался регулированием расхода отсасываемого газа по показаниям жидкостного манометра (5).

После окончания опыта решетка очищалась, пробы шлака, золы и уноса собирались для анализа. Время длительности одного опыта обычно составляло 4-5 часов.

Надо отметить, что определение КПД парового котла методом обратного баланса является единственным при оценке тепловой экономичности котлоагрегата, сжигающего твердое топливо. Зная тепловые потери, а следовательно КПД брутто котла, можно определить расход топлива на котел:

$$B = \frac{Q_{ка}}{0,01 Q_p \cdot \eta_{ку}} \cdot \frac{кг}{ч} \quad (2.9)$$

2.1.2. Методы исследования температурных полей

Измерение температур в топке является одним из самых сложных и трудоемких видов измерений при испытаниях котельных уста-

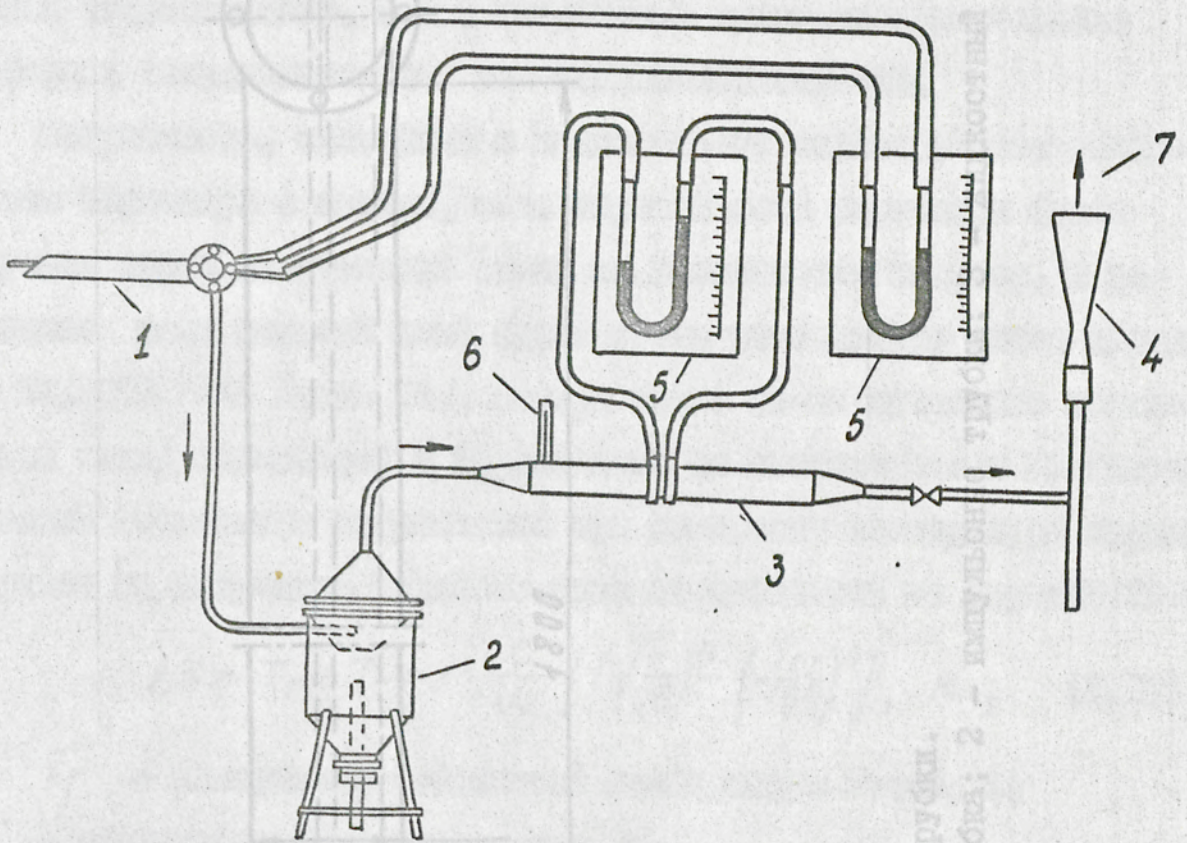


Рис. 2.2. Установка для отбора проб уноса

1 - отборная трубка; 2 - циклон; 3 - мерный участок; 4 - эжектор; 5 - жидкостные манометры; 6 - термометр; 7 - сброс газа и отработанного воздуха.

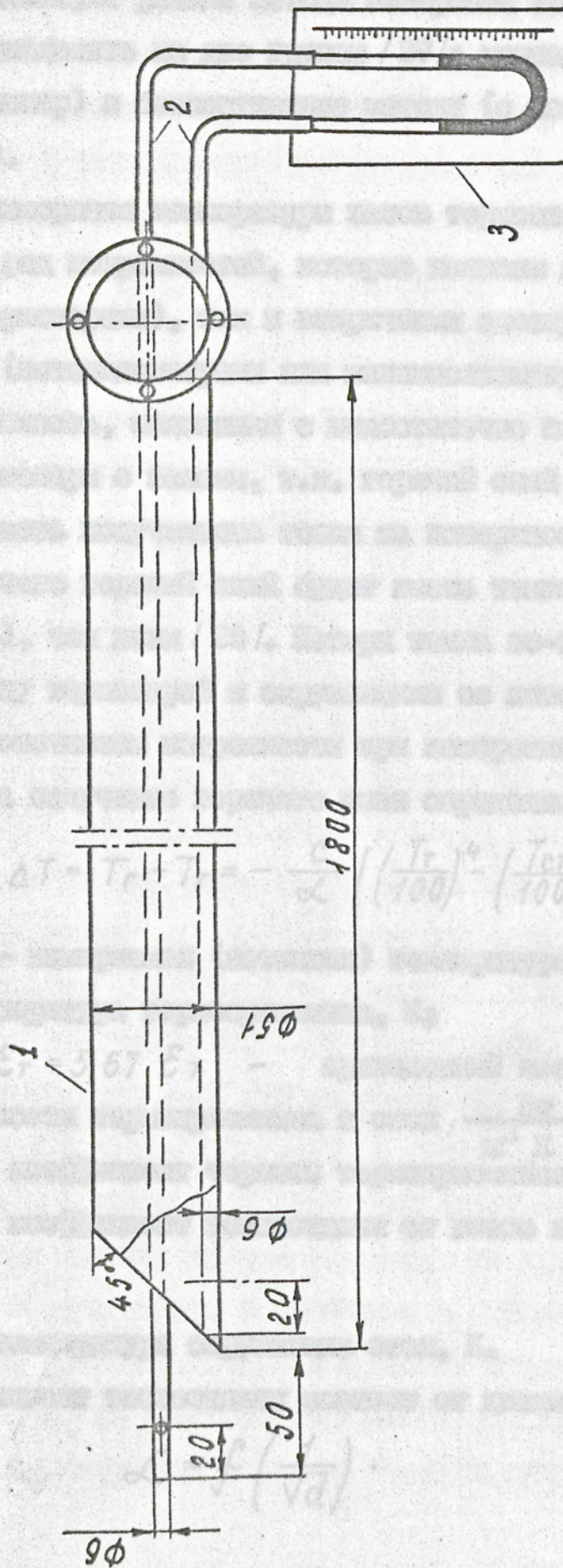


Рис. 2.3. Схема отборной трубки.

1 - отсосная трубка; 2 - импульсные трубки; 3 - жидкостный манометр.

новок. Существуют разные методы измерения температуры газов, их можно разделить на две группы /27/: контактные методы (с помощью термометров) и бесконтактные методы (с помощью пирометров излучения).

При измерении температуры газов термоэлектрическим методом возникает ряд погрешностей, которые вызваны как первичными приборами (термометрами), так и вторичными электронизмерительными приборами (потенциометрами или милливольтметрами).

Погрешность, связанная с недостаточным полным учетом теплообмена термометра с газом, т.е. горячий спай термометра будет излучать часть полученного тепла на поверхности нагрева, в результате чего горячий спай будет иметь температуру более низкую (на 10,20%), чем газы /28/. Потери тепла из-за лучистого теплообмена между термометром и окружающей его поверхностью являются основной причиной погрешности при измерении температуры газов. Поправка на излучение горячего спая определяется по формуле /29/:

$$\Delta T = T_r - T_t = - \frac{C}{\mathcal{L}} \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ct}}{100} \right)^4 \right], \text{ К}, \quad (2.10)$$

где T_r — измеряемая (истинная) температура газов, К;

T_t — температура термометрическая, К;

$C = C_0 \varepsilon_t = 5,67 \varepsilon_t$ — приведенный коэффициент излучения поверхности термометрическая и стен, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$;

ε_t — коэффициент черноты термометрическая;

$\mathcal{L}$ — коэффициент теплоотдачи от газов к термометрическую, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$;

T_{ct} — температура окружающей стен, К.

Коэффициент теплоотдачи зависит от диаметра термометра:

$$\mathcal{L} = f \left(\frac{1}{\sqrt{d}} \right). \quad (2.11)$$

Чем меньше диаметр корпуса термометра, тем меньше ΔT , т.е. тем меньше радиационные потери горячего спая. На этом принципе основан метод измерения двумя термометрами с разными диаметрами спаев. В этом случае температура газов определяется по формуле [30, 31]:

$$T_r = T_1 + \frac{T_1 - T_2}{\varphi - 1}, \quad (2.12)$$

где T_1 и T_2 — температуры первого и второго термодатчиков, К;
 φ — величина, зависящая от условий измерения; для стационарных условий определяется по формуле [30]:

$$\varphi = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{1-n} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4, \quad (2.13)$$

где d_1, d_2 — диаметры термоэлектродов.

Довольно эффективным способом уменьшения влияния лучистого теплообмена является применение термометра с защитой экранами рабочего конца термометра в виде одной или нескольких концентрических трубок, температура которых ниже, чем температура спаев $T_{ср}$. Искусственный отсос газов через термометр позволяет увеличить коэффициент $\mathcal{L}$ и, следовательно, уменьшить ошибку (ΔT , см. формулу (2.10)). Надо отметить, что экранирование термометра не исключает полностью погрешность измерения, которая обычно не превышает 2-3% при скорости отсоса газов 100-120 м/с, при температуре 1273-1473 К/27/. К сожалению при измерении температуры в замкнутом газовом потоке линии отсоса часто забиваются, поэтому экранированные термометры используются при несоздаваемых полях температур, в основном, в газопыльных потоках.

Широкое распространение в практике определения температуры газов на выходе из топки котлоагрегата или циклонного предтопа имеет термодинамический прибор Вентури, принцип которого осно-

ван на зависимости плотности газа от температуры. Газ отсосывается эжектором и пропускается последовательно через два сопла. Через первое сопло газ проходит с высокой температурой, через второе — со значительно меньшей, так как центральная трубка между соплами охлаждается водой. После второго сопла по колу газов располагается термометр сопротивления или термопара.

Действительная температура газов определяется по формуле (2.14) / 27 /:

$$T_1 = K \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} T_2, \quad (2.14)$$

где ΔP_1 , ΔP_2 — перепады давления в первом "горячем" и втором "холодном" соплах, Па;

T_2 — температура газа в "холодном" сопле, К;

K — тарировочный коэффициент прибора, определяемый при протекании холодного газа через прибор ($T_1 = T_2$). При сжигании твердых топлив длительность непрерывной работы пирометра составляет не более получаса / 32 /. Погрешность измерения при температуре 1270–2270 К не превышает 2,5%.

Погрешность может быть вызвана неоднородностью термоэлектродных материалов, т.к. химический состав термоэлектродных материалов, идущих на изготовление термопары, изменяется в пределах установленных технологических допусков. Погрешность измерения по причине неоднородности термоэлектродных материалов может меняться в пределах $\pm (0,15-2)\%$ / 33 /.

Существует так же основная погрешность вторичного прибора. Для измерения термо ЭДС, развиваемых термопарами, применяются два вида электронизмерительных приборов: потенциометры и милливольтметры.

Милливольтметры обладают рядом существенных недостатков.

Показания их зависят от наличия вблизи прибора посторонних магнитных полей и изменения температуры окружающей среды (погрешность обычно составляет около 3-5%).

При испытаниях рекомендуется /27/ применять многоточечные потенциометры типа КСП, ЭП-03 и ПСИ, которые автоматически компенсируют изменение температур свободных концов термодпар. Они обеспечивают большую точность (погрешность составляет $\pm (0,2-0,5)\%$ для переносного потенциометра типа ПП /27/). При использовании переносных потенциометров необходимо учитывать погрешность определения температур свободных концов термодпар. Поправка на температуру свободных концов может быть вычислена аналитически /33/.

Погрешность определения температур свободных концов термодпар в наших опытах можно оценить в пределах $\pm 0,2\%$.

В /34/ приведены различные способы градуировки термодпар, которые дают погрешность не более $\pm (0,2-0,3)\%$.

В практике испытаний котельных установок оптический пирометр используется, главным образом, для определения температуры светящегося факела. Оптический метод практически не имеет верхнего предела измерений и, являясь бесконтактным, не искажает температурное поле. Однако он имеет ряд недостатков /27/. При его применении нельзя определить локальную температуру. Он имеет меньшую точность, чем контактный метод. Возможна субъективность отсчета, обусловленная качеством зрения наблюдателя и необходимостью субъективного участия. Невозможно применять оптический пирометр для измерения температуры в тонне при сжигании газового топлива.

Оптические пирометры измеряют яркостную температуру (T_y), которая всегда меньше истинной (T_u). Последнюю можно опреде-

лить по закону Вина (при температуре среды меньше 3000 К) / 35, 36 / :

$$\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_u} = \frac{L_3}{c} \ln \frac{1}{\epsilon_L} \quad , \quad (2.15)$$

где L_3 - эффективная длина волны, м;

$c = 1,4388 \cdot 10^{-2}$, м · К ;

ϵ_L - спектральный коэффициент излучения.

Значение измеряемой яркостной температуры тем ближе к истинной, чем больше коэффициент ослабления света, т.е. с увеличением поглощения излучение пламени приближается к излучению абсолютно черного тела. Надо отметить, что температура, измеряемая оптическим пирометром, соответствует температуре в тонке на расстоянии от стенки 1,5-2 м.

Для уменьшения погрешности, связанной с субъективными данными наблюдателя, рекомендуется проводить повторные измерения температуры другим наблюдателем. Погрешность измерения температуры оптическими пирометрами составляет $\pm 1,5-2,0\%$ / 35 / . В / 33 / проведены оценка погрешности результатов измерений температуры оптическими пирометрами и показано, что в интервале температур 1050...1700 К погрешность лежит в пределах ± 10 К.

Для наших измерений в основном использовался оптический пирометр типа " CHINO " японского производства, которым измерялась температура в нижней зоне тонки и на решетке. В средней и верхней частях тонки вследствие достаточной прозрачности факела для измерения температуры необходимо было употреблять охлаждаемый зонд (см. рис. 2.1). Внутри зонда вводилась термопара, которая подключалась к местному потенциометру типа КСН. Длина зонда позволяла замерить температуру газов в среднем вертикальном сечении тонки. Все используемые термопары, такие как потенциометр и пирометр, были предварительно проверены и

и оттарированы.

Погрешность наших замеров составляет $\pm 3,3\%$ при замерении температуры газов с термопарами и $\pm 1,5\%$ — с оптическим прибором.

2.1.3. Методы последования полей газового анализа

В практике проведения газового анализа при испытанных котельных агрегатах широкое распространение получили следующие методы: волномерный и хроматографический.

Волномерный метод газового анализа основан на измерении сокращения объема пробы анализируемого газа, происходящего в результате реакций абсорбции, сжигания и каталитического окисления. Из газоанализаторов волномерного типа аппараты типа ОРСа являются наиболее простыми и предназначены для определения в смеси концентраций CO_2 , O_2 и CO .

При проведении газового анализа с помощью волномерных газоанализаторов (ОРСа и ВТМ) появляются следующие погрешности: /27/

1. погрешность отсчета по шкале измерительной биретки; для газоанализатора типа ОРСа она может быть принята равной половине цены деления измерительной биретки, т.е. $0,1 \text{ см}^3$;
2. относительная погрешность из-за неполноты поглощения газа реактивом, которая принимается равной $\pm (1-1,5)\%$ для RO_2 и O_2 , а $\pm 2\%$ для C_nH_m и CO ;
3. относительная погрешность из-за растворимости газа в запирающей жидкости газоанализатора, которая может быть принята равной $\pm 1\%$;
4. относительная погрешность из-за недостаточной представительности пробы газа, она может быть принята равной $\pm (3-3,5)\%$.

Большое значение для точности и надежности результатов газового анализа имеют правильный отбор и сохранение пробы газа. Пробу газа следует отбирать при постоянном токовом режиме в наиболее узком месте газотока с высокой скоростью потока, что способствует лучшему перемешиванию продуктов горения. При температуре газов выше 673 К для отбора проб газа применяются стальные трубки с водяным охлаждением, чтобы исключить догорание в трубке негорючих ранее компонентов при каталитическом действии нагретой поверхности трубки /27/.

Хроматографический метод является наилучшим для определения состава дымовых газов при испытаниях котельного агрегата. Хроматография является физико-химическим методом разделения, в процессе которого разделяемые компоненты распределяются между двумя фазами. Одна из этих фаз представляет собой стационарный слой, а другая — подвижный и фильтруется через слой неподвижной фазы. Существуют два варианта хроматографии; газодсорбционная и жидкостная /37,38,39,40/. При анализе продуктов горения используется первый вариант.

Хроматографический метод анализа газов позволяет с большой точностью и очень быстро проводить определение в дымовых газах содержания H_2 , CO , CH_4 , O_2 , CO_2 и N_2 с относительной погрешностью $\pm 5\%$ /27/.

В работе /41,42/ показано, что при проведении газового анализа с целью определения концентрации горючих (H_2 , CO и CH_4) необходимо отказаться от предварительного (до хроматографа) анализа на аппаратах ВТИ и ОРСа, т.к. в этом случае проба обогащается окисью углерода.

Анализ газов при определении поля газового анализа в топке котла "Рето" осуществлялся аппаратом типа ОРСа. Для отбора проб

газов из топки был использован охлаждаемый зонд (рис.2.1), длина которого позволяла отобрать газы по среднему вертикальному сечению топки. Относительная погрешность замеров составила $\pm 3,2\%$ для определения концентрации RO_2 и $\pm 3,6\%$ - для O_2 .

2.2. Результаты испытаний котла "Рето" (CV-25-18).

2.2.1. Характеристики объекта исследований

Котел "Рето" CV-25-18 кубинского производства широко используется на сахарных заводах республики. Частицы bagasse подаются механическими забрасывателями (всего 3) в объем топки, в котором во взвешенном состоянии сгорают мелкие фракции. Нагрев воздуха осуществляется продуктами сгорания в трубчатом воздухоподогревателе. Внутри труб $\phi 40 \times 1,6$ мм сверху вниз проходят продукты сгорания, а воздух движется между трубами (поперечное охлаждение). От воздухоподогревателя первичный воздух транспортируется к нижней части решетки, через которую поступает в топку. Вторичный воздух подается над слоем bagasse через ряд сопел, расположенных на задней стенке топки.

Пароперегреватель состоит из змеевиков $\phi 32 \times 3$ мм. Поверхностный парохладитель установлен в рассечку и состоит из змеевиков $\phi 25 \times 3$ мм, внутри которых протекает питательная вода.

Котельный пучок состоит из 17 рядов труб $\phi 57 \times 3,5$ мм (по ходу газов), которые соединяют верхний барабан ($\phi 1500$ мм) и нижний барабан ($\phi 1000$ мм). Очистка поверхностей нагрева (котельного пучка и пароперегревателя) осуществляется паровой обдувкой. Под нижним барабаном находятся 3 бункера, где накапливается зола, которая транспортируется пневматическим способом в топочную камеру, откуда затем удаляется через решетку. Основ-

ные параметры котла "Рето" CV -25-18 приведены в таблице I.12.

Для исследования работы котла "Рето" CV -25-18, нами была проведена серия испытаний на котле № 2 сахарного завода "Лос Рейнальдос" в провинции Сантьяго-де-Куба. Этот сахарный завод был выбран по следующим причинам:

1. большое потребление сахара по сравнению с другими сахарными заводами;
2. увеличение потребления пара в ближайшем будущем по причине новых инверсий.

Котел "Рето" № 2 был установлен на сахарном заводе "Лос Рейнальдос" в 1984 году. Среди основных проблем, относящихся к техническому состоянию котла до испытаний, можно отметить следующие:

1. отсутствие наладки режима работы котлоагрегата;
2. неравномерное горение во времени и на поверхности решетки;

В первые годы после начала эксплуатации котла довольно часто происходило разрушение труб пароперегревателя, что, по видимому, связано с недостаточностью охлаждения их паром. Это, в свою очередь, объясняется малой скоростью пара (21 м/с при нагрузке 25 т/ч). Кроме этого, неравномерное распределение температуры газов по сечению газохода вызванное неравномерностью слоя сахара на решетке увеличивало температуру металла труб пароперегревателя. С целью решить эту проблему уменьшили число труб пароперегревателя на 33%, благодаря чему скорость пара увеличилась до 31 м/с. В настоящее время разрывов труб пароперегревателя не отмечается.

При работе котла наблюдаются большие изменения давления в топке, а иногда давление в ней оказывается больше атмосферного.

ферного. Этот факт объясняется, по-видимому, нестабильностью подачи и горения топлива. В последнее время часто происходили утечки воды из-за разрыва трубы задней стенки топки.

Во время эксплуатации неоднократно наблюдалась динамическая неуравновешенность дилузора, которая объясняется абразивным износом крыльчатки потоком золы и частиц. В январе 1967 года произошла авария — загорелся воздухоподогреватель. Среди причин этого возгорания основной является вынос большого количества золы частиц из топочной камеры.

Надо отметить, что до сих пор этот котел работает без вентилятора для вторичного воздуха.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что отсутствие должной наладки режима горения этого котла приводит к авариям. Для определения фактической экономичности котла и надежных режимов эксплуатации были проведены его балансовые испытания.

Перед испытаниями на котле были проведены следующие подготовительные работы:

1. установлена система подвода и отвода воды для охлаждения термозондов;

2. смонтирована система для отбора проб продуктов горения с энентором;

3. установлены на боковой стенке топки восемь экспериментальных люков, необходимых для проведения внутритопочных измерений;

4. уплотнены топка и газоходы котла;

5. изготовлены и откалиброваны измерительные приборы; проверены экспериментальные приборы.

С целью тренировки персонала, который принимал участие в

испытаниях, были проведены предварительные опыты. На рис. 2.4 приведена схема размещения точек измерений при испытаниях.

2.2.2. Тепловой баланс котла

С целью определения величины потерь тепла в котле "Рото" CV-25-18 в зависимости от нагрузки, была проведена серия балансовых испытаний. Всего было проведено 4 опыта ($0,88 D_{ном}$, $0,74 D_{ном}$, $0,73 D_{ном}$ и $0,63 D_{ном}$).

В таблице 2.3 приведены основные параметры котла, полученные при испытаниях. Надо отметить, что стабильность нагрузки и параметров пара зависят, в первую очередь, от стабильности измельчения тростника. Работа этого сахарного завода характеризуется нестабильностью подачи тростника, перегрузкой конвейерной, часто ломается оборудование завода и т.д. Температура перегретого пара иногда превышает номинальное значение, что является главной причиной разрушения труб второй ступени (по пару) пароперегревателя. Это объясняется неправильным регулированием расхода проходящей через паросжигатель воды (см.рис. 2.9).

При испытаниях наблюдалась удовлетворительная стабильность влажности, зольности и теплоты сгорания топлива. Во время испытаний был проведен сытоный анализ бадассо (рис. 2.5).

В таблице 2.3 приведены значения тепловых потерь, полученные при испытаниях. Для обработки экспериментальных данных была составлена программа на языке Бейсик. Значения потерь тепла от химического недожого в опытах достигают 4% и на много превышают проектное значение 0,5% (см. рис.2.6). Это объясняется, в основном, тем, что питатели забрасывают наибольшую часть бадассо на заднюю часть решетки. Увеличение высоты слоя бадассо вызывает появление восстановительных зон, особенно, при

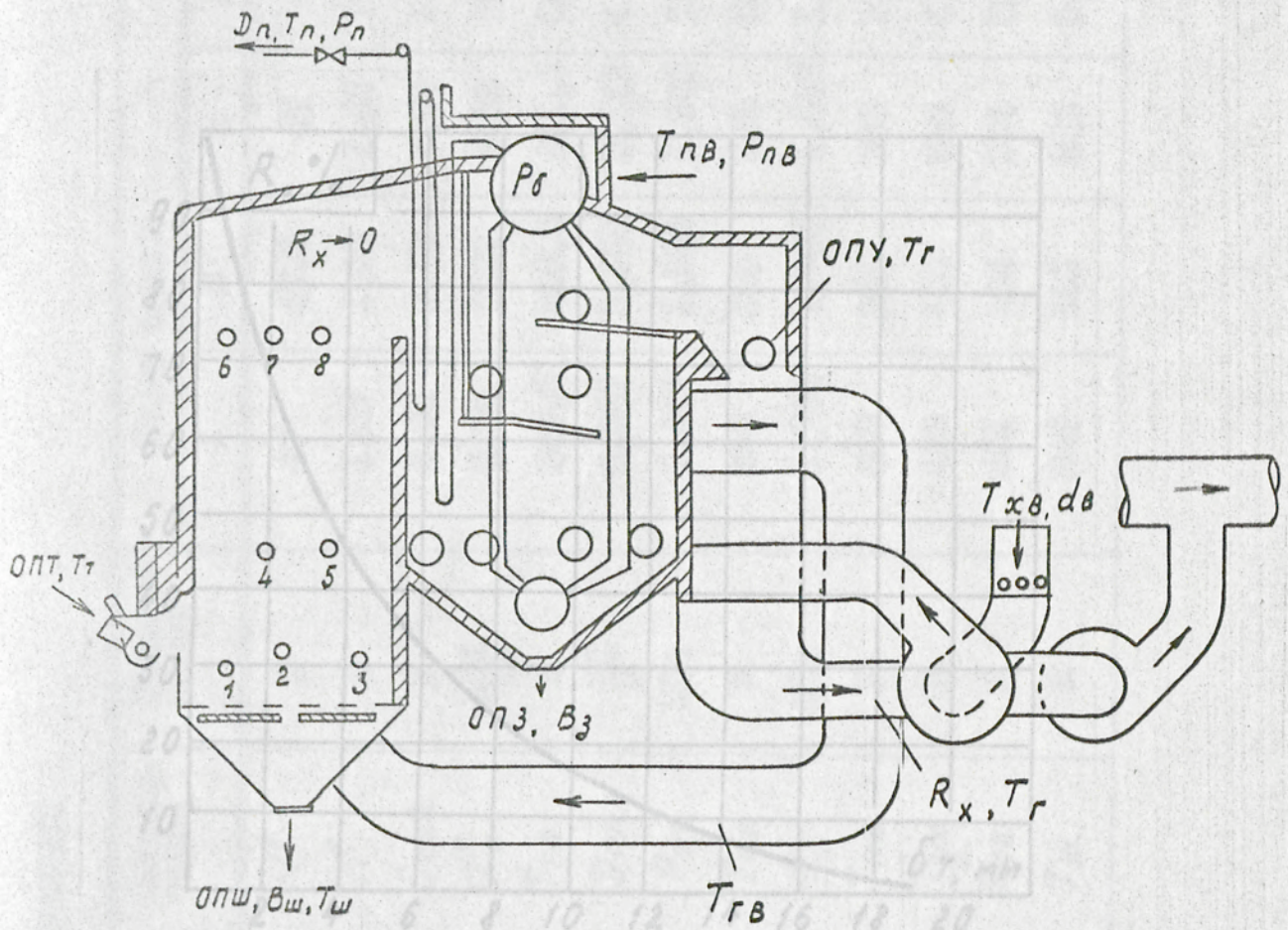


Рис. 2.4. Схема размещения точек измерений на котле Рето.

Рис. 2.5. 1-8 лючки. ОПТ, ОПШ, ОПЗ, ОПУ - отбор проб топлива, шлака, золы, уноса.

$B_{ш}$, $B_{з}$ - расход шлака и золы. $T_{т}$, $T_{ш}$, $T_{гв}$, $T_{г}$, $T_{хв}$, $T_{пв}$, $T_{п}$ - температура топлива, шлака, горящего воздуха, газов, холодного воздуха, питательной воды, пара. P_{δ} , $P_{п}$, $P_{пв}$ - давление в барабане, перегретого пара и питательной воды. $D_{п}$ - расход пара, $R_{х}$ - анализ газов. $d_{в}$ - влагосодержание воздуха.

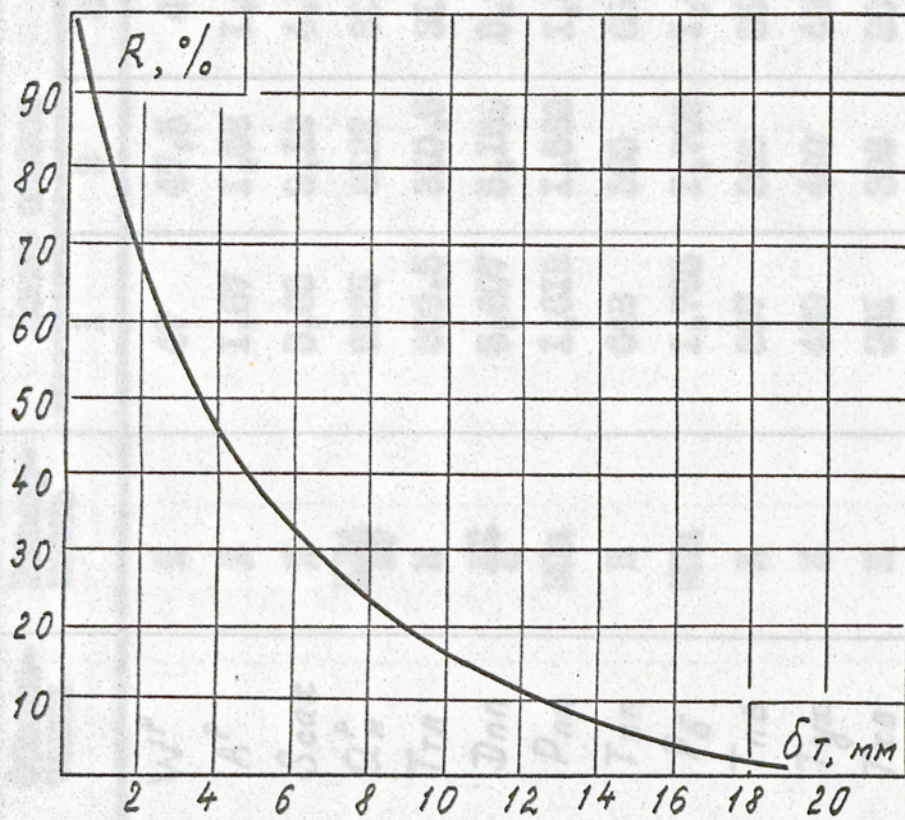


Рис. 2.5. Зерновая характеристика для багассо при испытаниях.

Таблица 2.3

Сводная ведомость результатов испытаний

Наименование показателей	Обозначения	Размерность	Число опытов			
			1	2	3	4
Вязкость топлива	W^P	%	47	47,5	47	47
Зольность топлива	A^P	%	1,67	1,69	1,65	1,5
Содержание сажи в топливе	$S_{сж}$	%	3,05	3,12	4,09	2,7
Низшая теплота сгорания	Q_H^P	$\frac{ккал}{кг}$	8225	8122	8182	8241
Температура топлива	$T_{тл}$	К	309,5	310,5	311,5	309,5
Расход перегретого пара	D_{nn}	$\frac{кг}{с}$	5,607	5,159	5,112	4,753
Давление перегретого пара	P_{nn}	МПа	1,618	1,562	1,545	1,224
Температура перегретого пара	$T_{пп}$	К	649	565	633	533
Давление пара в барабанах	P_{δ}	МПа	1,765	1,709	1,637	1,363
Температура питательной воды	$T_{пв}$	К	367	363	352	355
Температура уходящих газов	$T_{уг}$	К	489	490	485	476
Температура холодного воздуха	$T_{хв}$	К	301	306	304	303
Температура шлама	$T_{ш}$	К	547	545	553	543

Продолжение таблицы 2.3

Наименование показателей	Обозначения	Размерность	Номер опытов			
			1	2	3	4
Влагопоглощение сухого воздуха Состав газов на выходе из топли	d_B	$\frac{\text{г}}{\text{м}^3}$	13,42	13,35	14,77	13,36
	RO_2	%	15,5	15,6	16,4	15,5
	O_2	%	8,7	8,6	8,7	8,7
	RO_2	%	12,10	12,10	12,08	12,14
	O_2	%	7,08	7,10	7,10	7,10
Состав уходящих газов	CO	%	0,545	0,525	0,528	0,435
	H_2	%	0,1138	0,118	0,118	0,1731
	CH_4	%	0,0273	0,0276	0,0255	0,043
	α''		1,214	1,206	1,204	1,214
Коэффициент насыщения воздуха на выходе из топли	α_{yx}		1,463	1,470	1,471	1,469
	$\Delta\alpha$		0,254	0,264	0,257	0,255
Коэффициент насыщения воздуха уходящих газов						
Общий прирост по газовому элементу						

Продолжение таблицы 2.3

Наименование показателей	Обозначения	Размерность	Коэффициенты			
			1	2	3	4
Тепловой баланс						
Потери тепла с уходящими газами	q_2	%	15,45	14,39	14,78	14,15
Потери тепла с химическим недожогом	q_3	%	4,04	3,96	3,97	3,99
Потери тепла с механическим недожогом	q_4	%	3,99	4,23	3,85	3,46
Потери тепла в окружающую среду	q_5	%	1,49	1,61	1,63	1,75
Потери тепла с физическим топлем шлама	q_6	%	0,78	0,83	0,83	0,77
Сумма потерь тепла	$\sum q$	%	25,75	25,02	25,06	24,12
Коэффициент полезного действия котла (брутто)	η_{br}	%	74,25	74,98	74,94	75,88
Расход топлива	B	$\frac{кг}{ч}$	2,5589	2,2037	2,3495	2,0562

отсутствия вторичного воздуха. Потери тепла от химического поджога в котлах, сжигающих багассо, меньше в широких пределах и может достигать 2% при сжигании багассо в топках с решетками /22/.

Потери тепла от механического поджога были рассчитаны по балансу золы и оказались в пределах 3,5-4% (см. рис. 2.6), что близко к проектному значению - 4%. Количество летучей золы (уноса), выбрасываемое с дымовыми газами в дымовую трубу при сжигании превышало расчетное значение ($\alpha_{yn} = 0,5$) (см. табл. 2.4).

Полученные значения $\alpha_{yn} = 0,82$ превышают, как правило, в 5 раз значения $\alpha_{ш}$. Это свидетельствует о том, что в объеме топки сжигается большое количество багассо, больше, чем по проекту. Надо отметить, что зольность мелких фракций натурального багассо больше, чем крупных. В опытах отмечено некоторое увеличение потерь тепла от механического поджога с увеличением нагрузки, что по видимому связано с уменьшением времени пребывания частиц багассо в объеме топки. Величины потерь тепла q_4 в других котлах, сжигающих багассо, находятся так же в пределах 2-4% /43,44/.

В опытах значения коэффициента избытка воздуха в уходящих газах не достигают расчетных ($\alpha_{yx} = 1,54$) (см. рис. 2.6), что объясняется отсутствием вторичного воздуха. Общий присос воздуха по газовому тракту во всех опытах превышает расчетное значение ($\Delta \alpha = 0,24$) на 0,014-0,024.

Полученные значения температуры уходящих газов в опытах превышают на 17,2-18 К проектное значение ($t_{yx} = 472$ К), что является причиной высоких значений потерь тепла с уходящими газами. Относительно высокая температура уходящих газов объясняется, по-

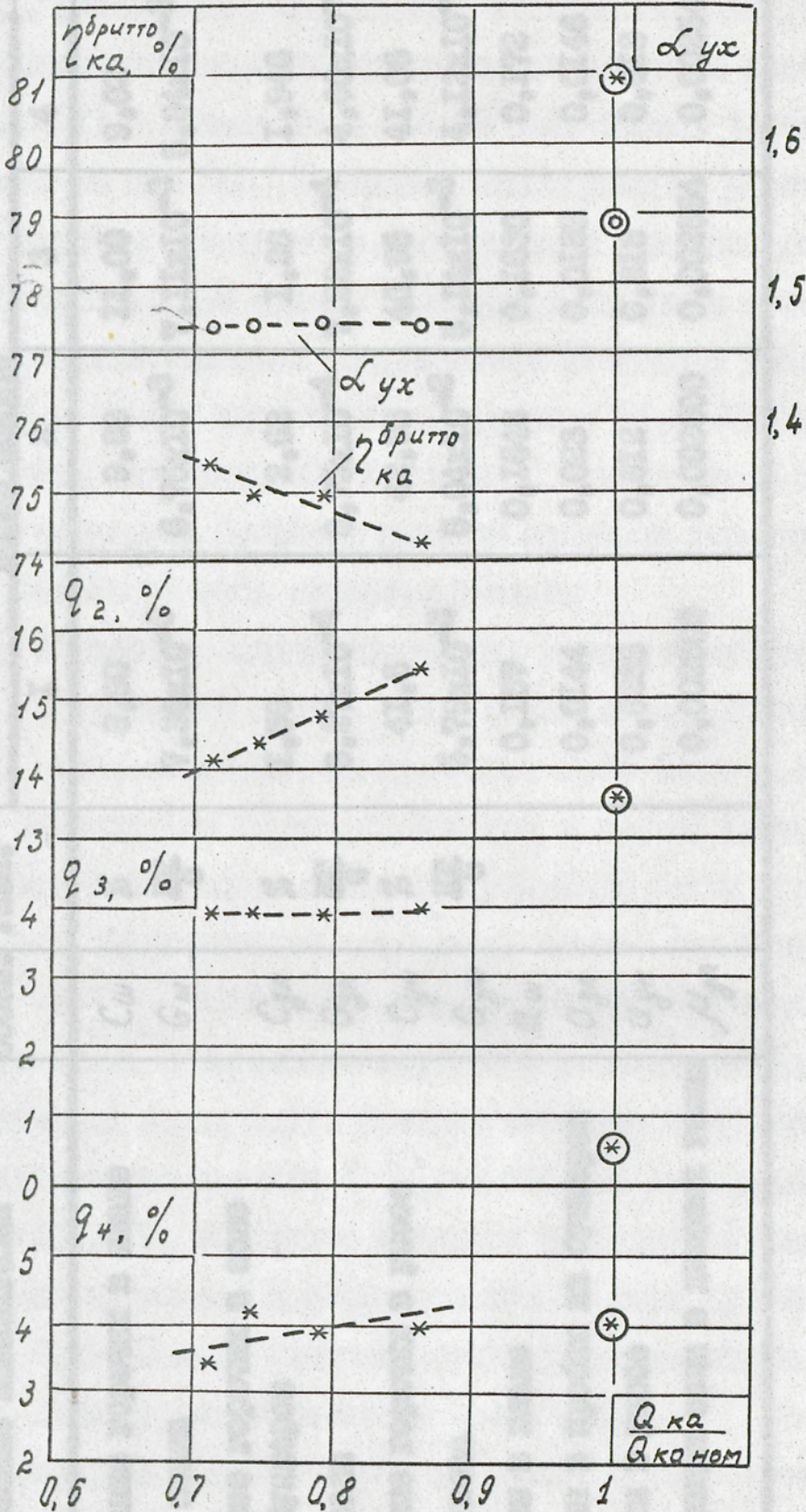


Рис.2.6. Коэффициент полезного действия и тепловые потери котла "Рето".

⊗ — проектное значение.

Таблица 2.4

Результаты золотого баланса

Наименование показателей	Обозн.	Разм.	Нормы единиц			
			1	2	3	4
Содержание горючих в шлаке	$C_{ш}$	%	8,90	9,33	11,00	9,02
Расход шлака	$G_{ш}$	$\frac{кг}{г}$	$7,36 \times 10^{-3}$	$6,75 \times 10^{-3}$	$7,11 \times 10^{-3}$	$5,84 \times 10^{-3}$
Содержание горючих в золе из под бункеров	$C_{зл}$	%	1,58	2,62	1,23	1,946
Расход зола	$G_{зл}$	$\frac{кг}{г}$	$6,27 \times 10^{-4}$	$8,75 \times 10^{-4}$	$7,22 \times 10^{-4}$	$4,60 \times 10^{-4}$
Содержание горючих в уносе	$C_{ун}$	%	41,5	42,33	40,36	41,06
Расход уноса	$G_{ун}$	$\frac{кг}{г}$	$5,79 \times 10^{-2}$	$5,04 \times 10^{-2}$	$5,14 \times 10^{-2}$	$4,12 \times 10^{-2}$
Доля зола в шлаке	$a_{ш}$		0,157	0,1648	0,1630	0,172
Доля зола в пробах из бункеров	$a_{зл}$		0,0144	0,023	0,0183	0,0146
Доля зола в уносе	$a_{ун}$		0,8235	0,812	0,818	0,813
Концентрация зола в дымовых газах	$\mu_{зл}$		0,002596	0,002600	0,002564	0,002548

видимому, увеличением загрязнений поверхностей нагрева. Относительно немалая скорость продуктов сгорания по газопотоку (см. приложение I) и фракционный состав зола бугаса (средний диаметр составляет 30 мкм / 43 /) создают благоприятные условия для образования сыпучих отложений в поверхностях нагрева, расположенных в зонах относительно низких температур газового потока / 45, 46 /.

Полученное значение коэффициента полезного действия (брутто) котла в опытах изменялось в пределах 74,25-75,88% (на 6,65-5,02 меньше, чем проектное значение). Относительно низкий КПД котла, в основном, является главной причиной высокого удельного расхода бугаса на этом сахарном заводе.

При обработке экспериментальных данных были получены абсолютные погрешности потерь тепла и КПД котла. Абсолютная погрешность определения КПД не превышает 3,2% (табл. 2.5). По обратному балансу (из пароперегревателя к топки) были получены зависимости температуры газов на выходе из топки и коэффициента тепловой эффективности экранов от безразмерной величины нагрузки $\frac{Q_{ка}}{Q_{каном}}$ (отношение полного количества тепла, полезно использованного в котельном агрегате, к номинальному значению этой величины) (рис. 2.7). Средняя величина коэффициента тепловой эффективности экранов ($\bar{\psi}_{ср} = 0,305$) не достигает проектного значения (0,458). Расчетное значение температуры газов на выходе из топки превышает проектное значение даже при относительной нагрузке 0,73 $D_{ном}$. Сходное поведение температуры газов наблюдается в зоне пароперегревателя (рис. 2.8).

Температура перегретого пара растет с увеличением нагрузки (рис. 2.9).

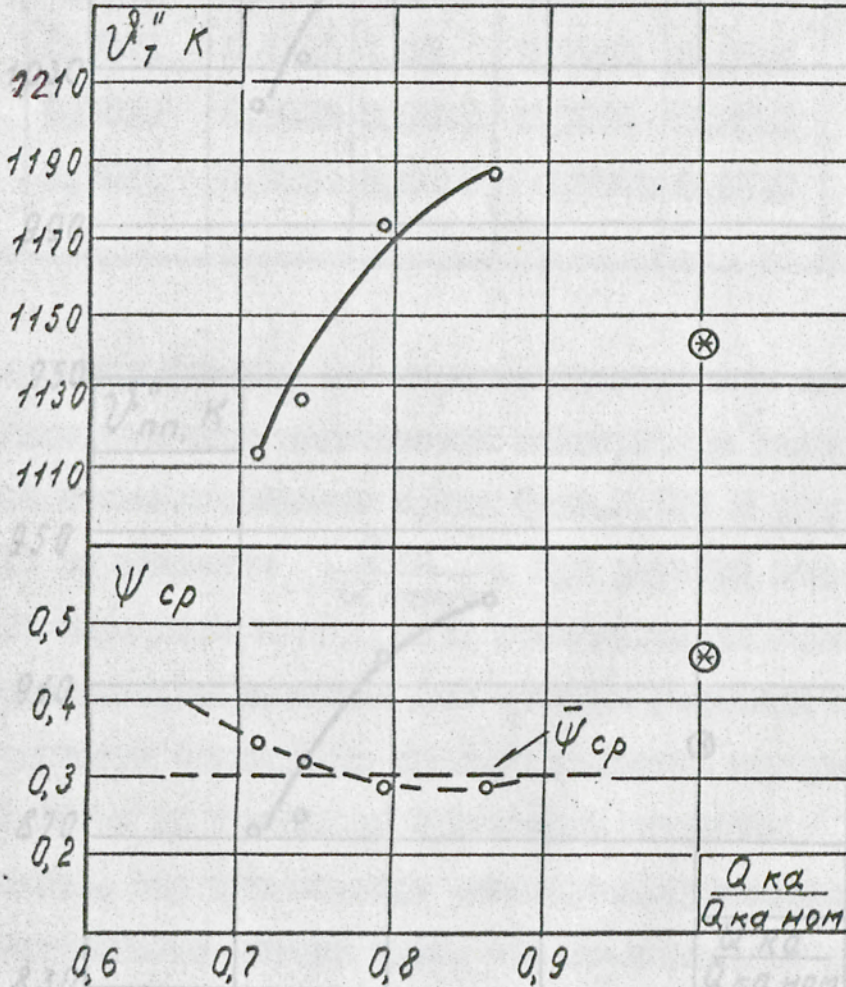


Рис.2.7. Расчетные значения температуры на выходе из топки и коэффициента тепловой эффективности экранов.

⊗ - проектное значение.

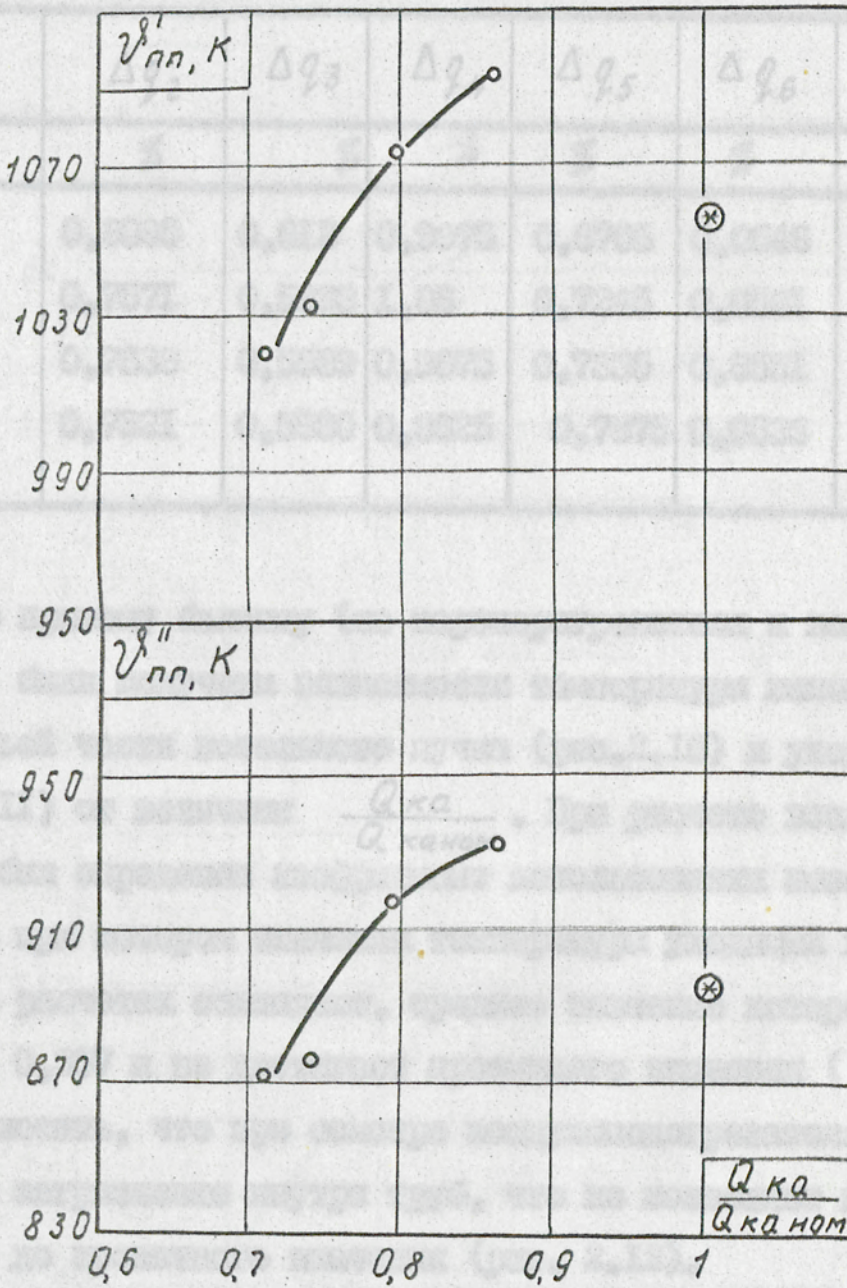


Рис.2.8. Расчетные значения температуры газов на входе ($v'_{пп}$) и на выходе ($v''_{пп}$) пароперегревателя.

⊗ - проектное значение.

Таблица 2.5

Абсолютные погрешности потерь тепла и КПД

Номер опыта	Δq_2	Δq_3	Δq_4	Δq_5	Δq_6	$\Delta \eta_{\text{кп}}^{\text{бр}}$
	%	%	%	%	%	%
1	0,8085	0,612	0,9975	0,6705	0,0546	3,1431
2	0,7571	0,5883	1,06	0,7245	0,0581	3,1837
3	0,7633	0,5939	0,9675	0,7335	0,0581	3,1168
4	0,7521	0,5930	0,8625	0,7375	0,0539	3,049

По прямому балансу (из пароперегревателя и воздухоподогревателя) были получены зависимости температур газов на выходе из третьей части котельного пучка (рис. 2.10) и уходящих газов (рис. 2.11) от величины $\frac{Q_{\text{ка}}}{Q_{\text{каном}}}$. При расчете воздухоподогревателя был определен коэффициент использования поверхности нагрева при котором значения температуры уходящих газов в опытах и в расчетах совпадают, среднее значение которого составляет $\eta = 0,357$ и не достигает проектного значения ($\eta = 0,65$). Надо отметить, что при осмотре воздухоподогревателя наблюдается сильное загрязнение внутри труб, что не позволяет нагревание воздуха до проектного значения (рис. 2.12).

В настоящее время не существуют экспериментальных данных о коэффициенте тепловой эффективности конвективных поверхностей нагрева котлов, сжигающих сагасо. В этом направлении необходимо провести ряд исследований.

Результаты балансовых испытаний показывают, что потери тепла с уходящими газами и химическим недоогомом превышают проектные значения для котла "Рото" CV -25-18. Полученные

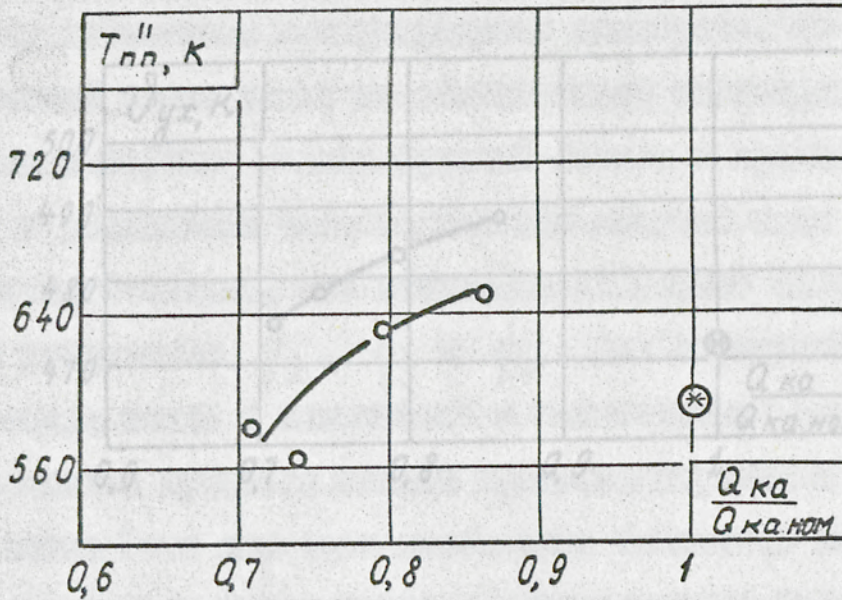


Рис. 2.9. Расчетные значения температуры уходящих газов.

Рис. 2.9. Экспериментальные значения температуры перегретого пара.

(*) - проектное значение.

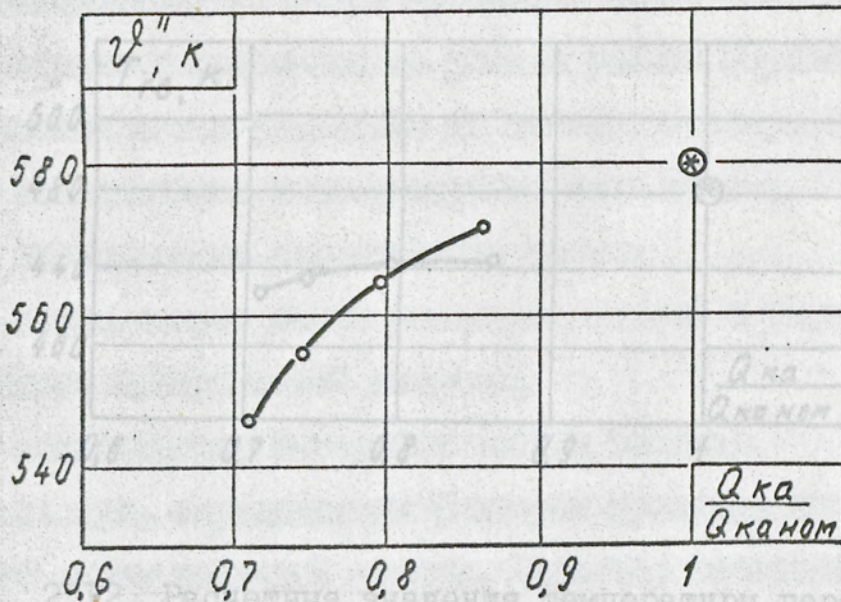


Рис. 2.10. Расчетные значения температуры горячего

Рис. 2.10. Расчетные значения температуры газов на выходе третьей части котельного пучка.

(*) - проектное значение.

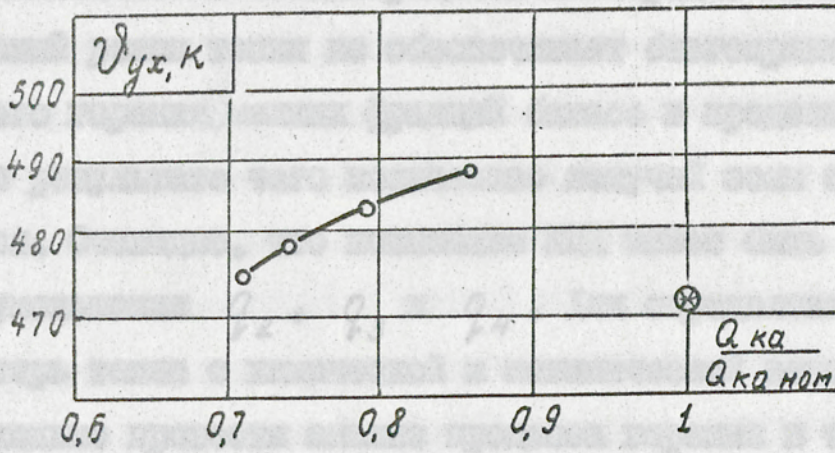


Рис. 2.11. Расчетные значения температуры уходящих газов.

(*) - проектное значение

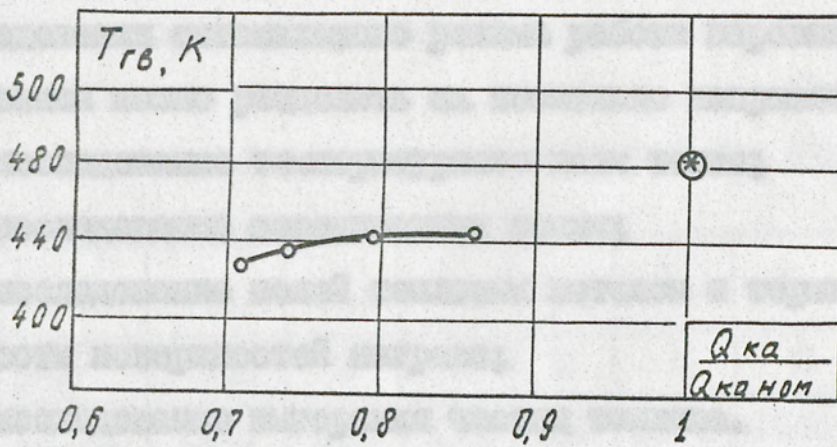


Рис. 2.12. Расчетные значения температуры горящего воздуха.

(*) - проектное значение.

значения потерь q_3 и q_4 объясняются относительно низким коэффициентом избытка воздуха, плохим смешиванием и недостаточными локальными концентрациями кислорода. По-видимому аэродинамический режим топки не обеспечивает благоприятные условия для полного горения мелких фракций сажи в пределах топочной камеры, в результате чего количество летучей сажи с уносом увеличивается. Очевидно, что повышение КПД может быть достигнуто на пути уменьшения q_2 , q_3 и q_4 . Для определения путей уменьшения потерь тепла с химической и механической неполнотой горения необходимо провести анализ процесса горения в топочном объеме котла Рето для чего необходимо выполнить внутритопочные исследования. Ранее такие исследования на Кубе не проводились.

2.2.3. Температурные поля топки

Исследования топочных процессов имеют большое значение для определения оптимального режима работы паровых котлов. Эти исследования можно разделить на несколько направлений /47/:

- исследование температурного поля топки;
- исследование аэродинамики топки;
- исследование полей тепловых потоков и термической эффективности поверхностей нагрева;
- исследование загорания частиц топлива.

Зачастую, определяющим фактором процесса является температурный режим топочной камеры. Характер изменения температуры топочных газов по длине факела определяется соотношением между тепловыделением горящего топлива и теплоотдачей факела к экранам топки /48,49/.

Однако специальных исследований, посвященных этому вопросу,

на Кубе не проводилось. В этом разделе представлены экспериментальные данные, полученные нами при исследовании температурного поля котла "Рето" на сахарном заводе "Лос Рейнольдс".

Во время испытаний регистрировались основные параметры котла (табл. 2.6). На рисунках 2.13, 2.14 приведены температурные поля, которые получены при нагрузках $0,56 D_{ном}$ и $0,68 D_{ном}$. Можно заметить, что зона максимальной температуры, более 1370 К — ядро факела — находится в нижней задней части камеры сгорания. Это распределение температуры соответствует опасному режиму факела, так как существует "наброс" факела на заднюю стенку. Такое расположение ядра факела объясняется скоплением багассы на этой части решетки. Зоны максимальных температур факела совпадают с зонами максимальных тепловых потоков. Это может привести к авариям при плохом водном режиме.

В январе 1989 года из-за разрыва труб заднего экрана произошла авария. При осмотре топочных экранов, после аварии, обнаружена некоторая деформация этих труб (они изогнуты).

Таблица 2.6

Основные характерные параметры котла при испытаниях

Номер опыта	$D_{пп}$	$P_{пп}$	$T_{пп}$	$T_{пв}$	T_{yx}	$\bar{T}_T''$	T_a	L_T''	$\frac{Q_{ка}}{Q_{каном}}$
	$\frac{кг}{с}$	МПа	К	К	К	К	К	-	-
1	3,89	1,40	593	383	440	1073	1645	1,21	0,56
2	4,75	1,22	583	355	458	1123	1653	1,21	0,70

При уменьшении нагрузки котла увеличивается неравномерность высоты слоя багассы на решетке, что вызывает резкое изменение поля температур факела над слоем (рис. 2.15).

$$D = 3,89 \frac{кг}{с} (0,56 D_{ном}).$$

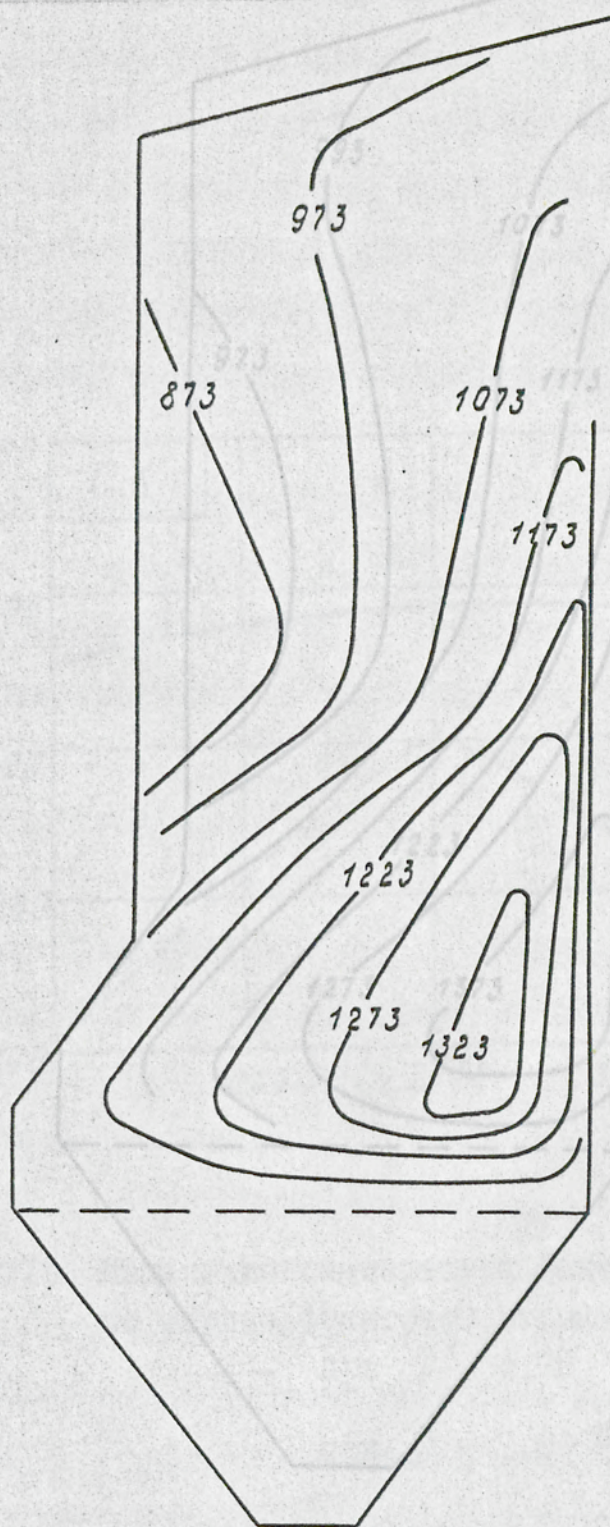


Рис. 2.13. Изотермы топки котла Рето при $D = 3,89 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ (0,56 $D_{\text{ном}}$).

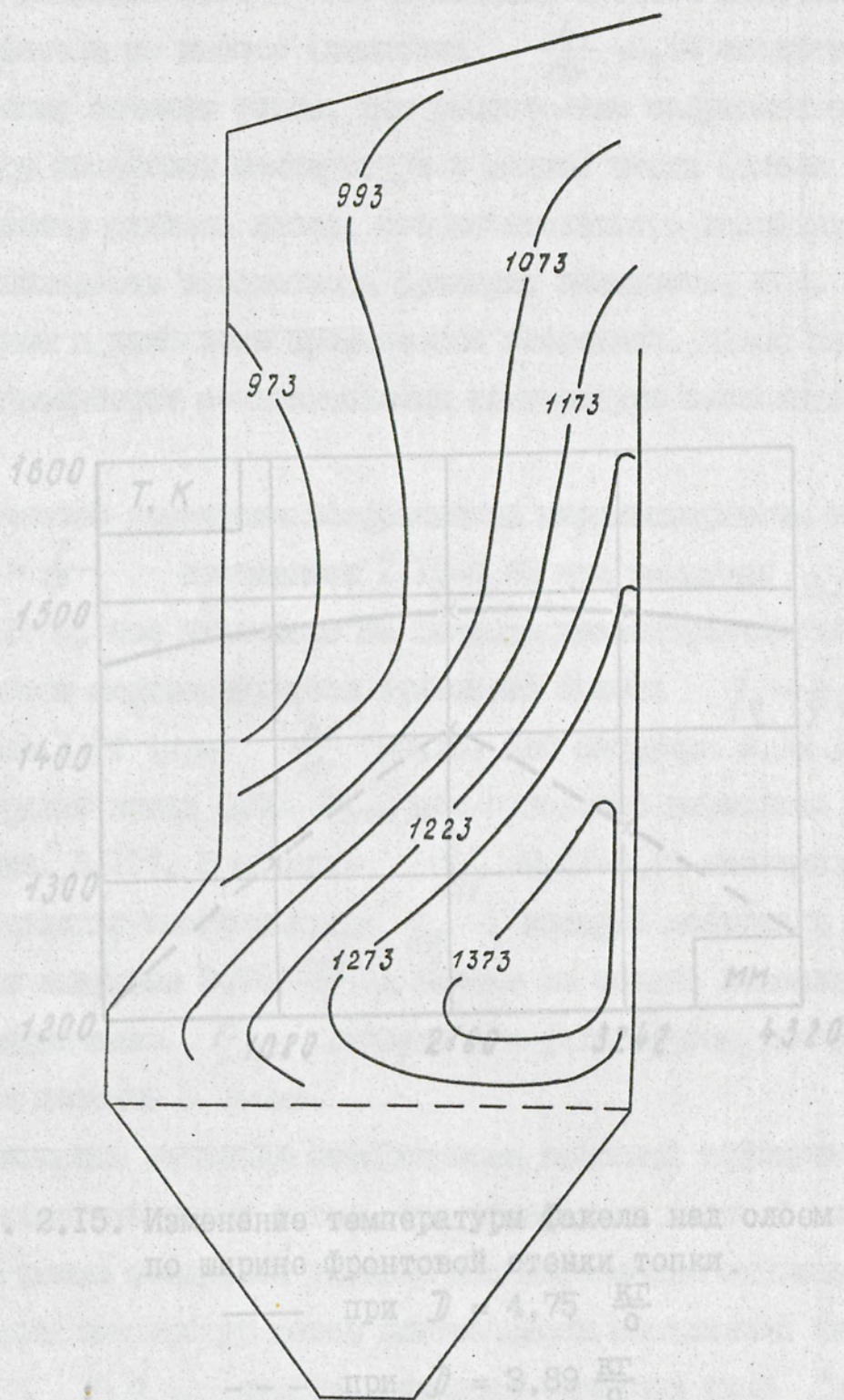


Рис. 2.14. Изотермы топki котла Рето при $D = 4,75 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$
($0,68 D_{\text{ном}}$).

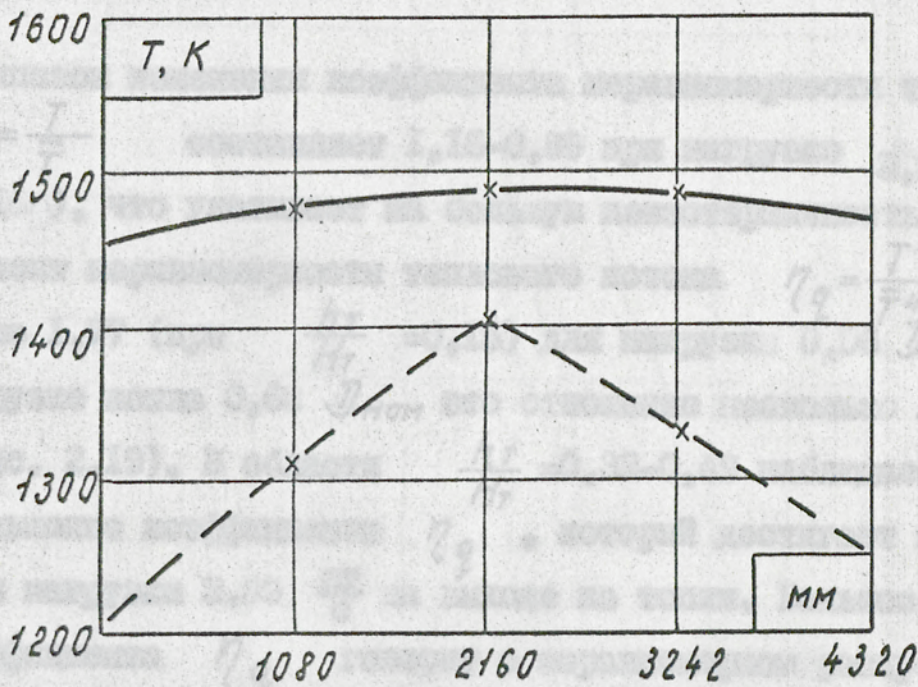


Рис. 2.15. Изменение температуры факела над слоем багасо по ширине фронтальной стенки топки.

— при $D = 4,75 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$

--- при $D = 3,89 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$

На рисунках 2.16 и 2.17 приведены средние значения температуры факела по высоте (величина $\frac{h_T}{H_T} = 0,15$ соответствует продольному сечению топки, где расположены забрасыватели). По характеру изменения температуры в нижней части факела (до $\frac{h_T}{H_T} = 0,32$) можно сделать вывод, что интенсивность тепловыделения и интенсивность теплоотвода примерно одинаковы, т.к. температура газов в этой зоне практически постоянна. Далее из-за снижения интенсивности тепловыделения температура постоянно уменьшается.

Диапазон изменения коэффициента неравномерности температуры $\eta_T = \frac{T}{\bar{T}}$ составляет 1,16-0,89 при нагрузке 3,89 $\frac{кг}{с}$ (рис. 2.18), что указывает на большую неизотермичность топки. Коэффициент неравномерности теплового потока $\eta_q = \frac{T^4}{\bar{T}^4}$ лежит на уровне 1,77 (при $\frac{h_T}{H_T} = 0,15$) для нагрузки 0,56 $\frac{кг}{с}$; при нагрузке котла 0,68 $\frac{кг}{с}$ это отношение несколько понижается (рис. 2.19). В области $\frac{h_T}{H_T} = 0,32-0,49$ наблюдается резкое уменьшение коэффициента η_q , который достигает значения 0,63 для нагрузки 3,89 $\frac{кг}{с}$ на выходе из топки. Большое изменение коэффициента η_q говорит о неравномерном распределении тепловых потоков в топке.

Невысокие значения коэффициента тепловой эффективности экранов свидетельствуют о том, что вследствие высокой температур газов в топке создаются условия для нарастания отложений. В зоне высоких температур газов легкоплавкие соединения (например,

Na_2O , K_2O , оксиды металлов типа CaO , MgO , FeO с кремнеземом SiO_2 и глинистыми минералами на основе Al_2O_3 /50/) могут переходить в парообразное состояние и затем конденсироваться на относительно более холодной поверхности труб котельного пучка /51/. Экспериментальных данных о процес-

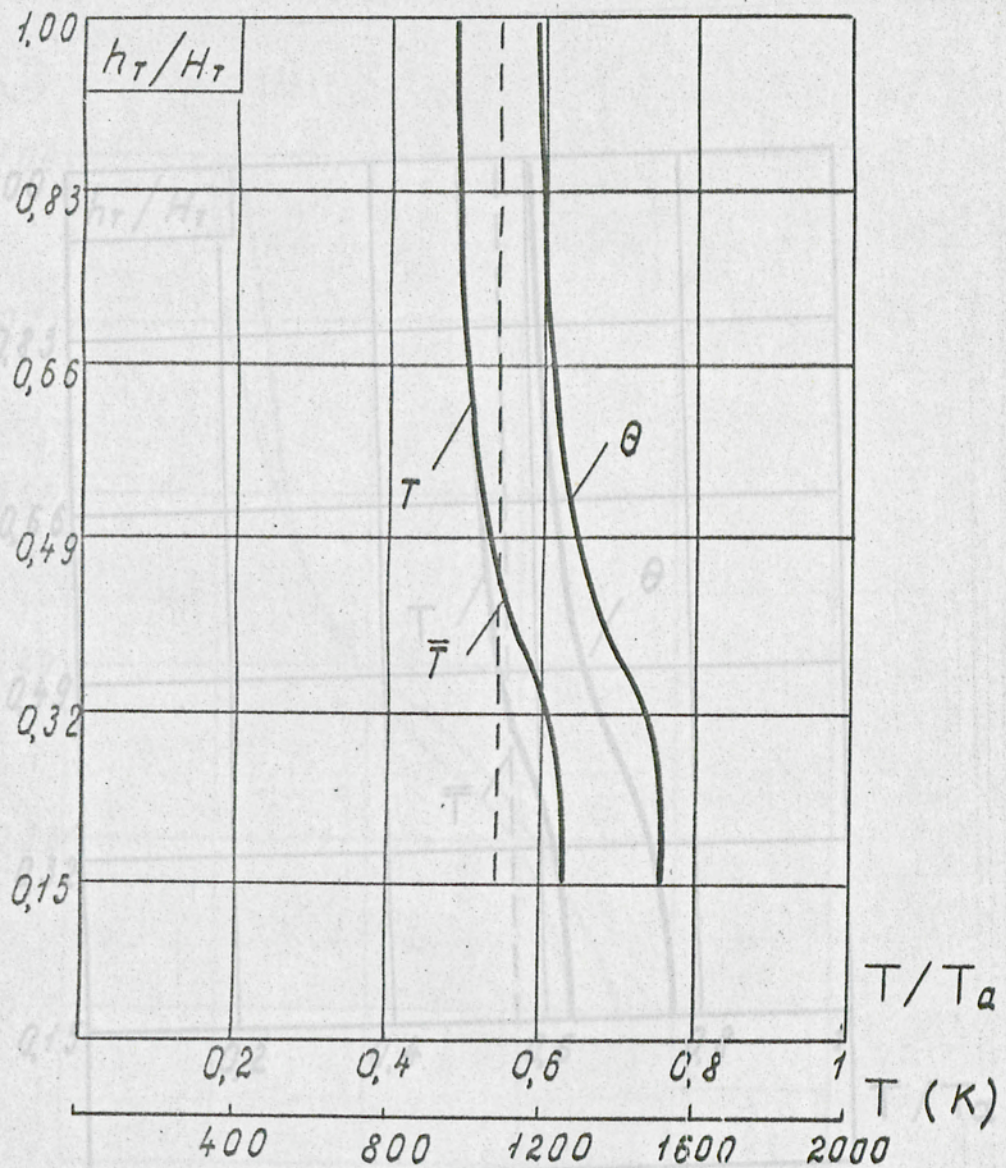


Рис.2.16. Изменение температуры факела по высоте топки

при $D = 3,89 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$

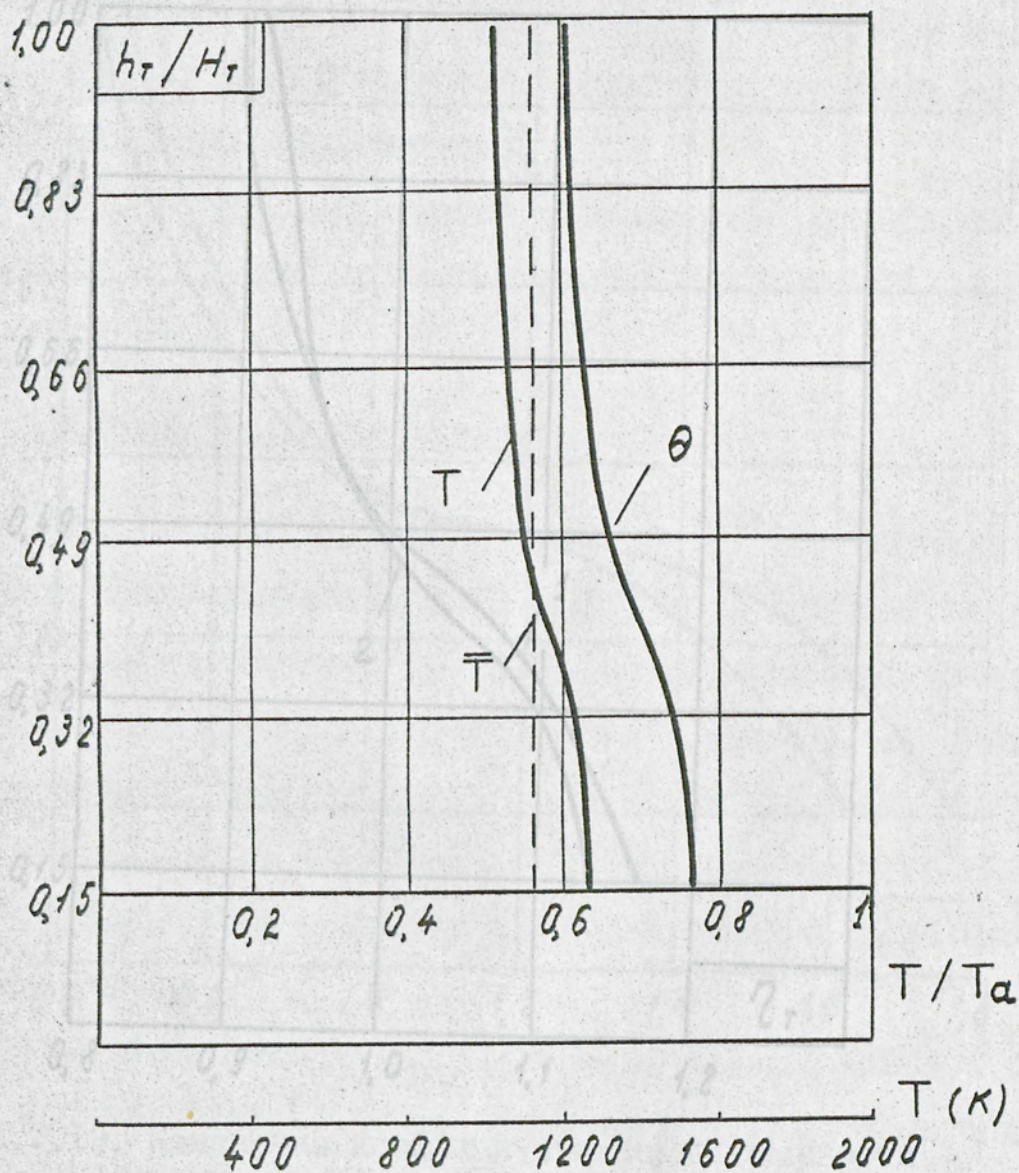


Рис. 2.17. Изменение температуры факела по высоте топки при $D = 4,75 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$

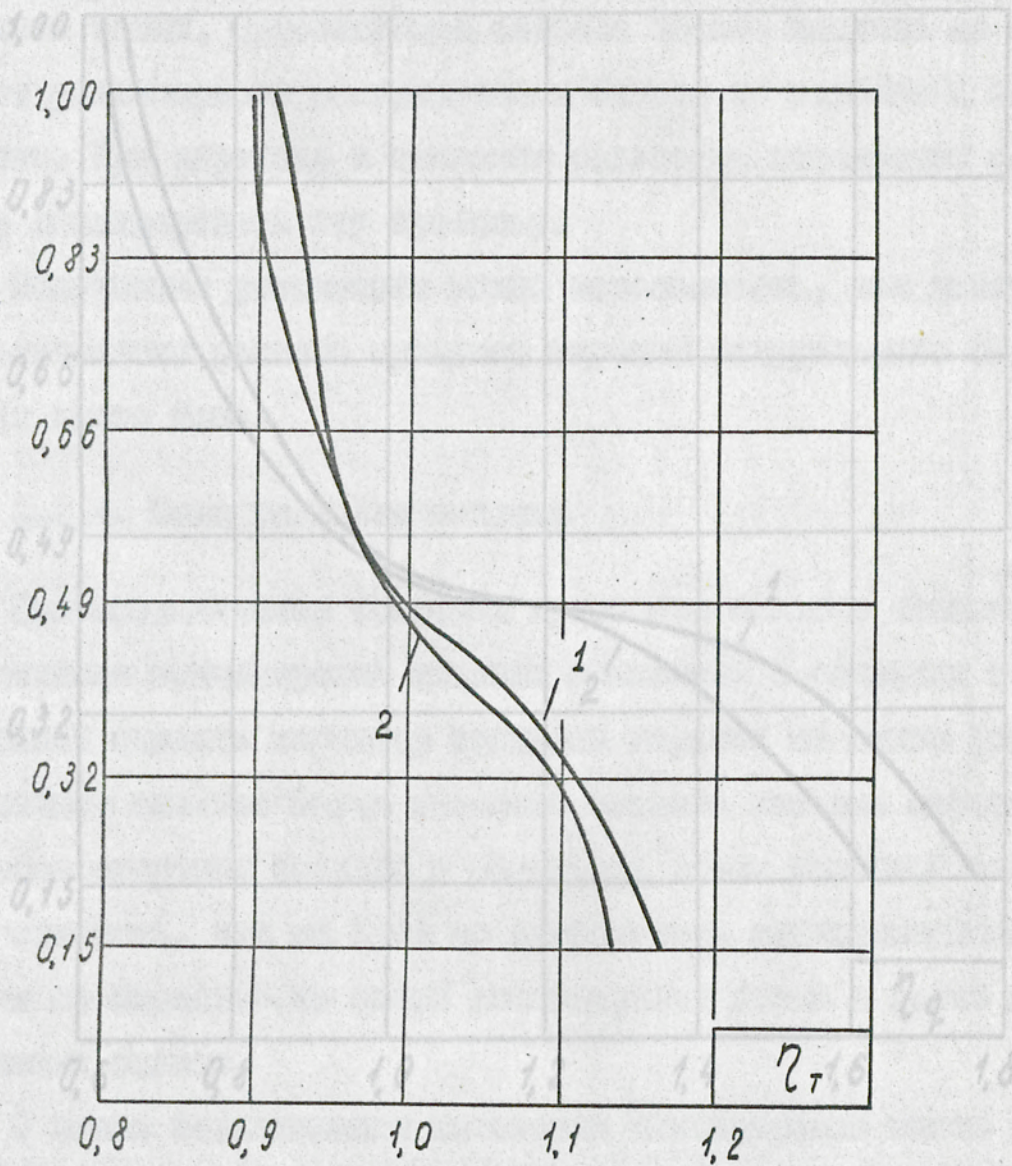


Рис. 2.19. Изменение коэффициента неравномерности

Рис. 2.18. Изменение коэффициента неравномерности температуры по высоте топки.

1 - при $D = 3,89 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$; 2 - при $D = 4,75 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$

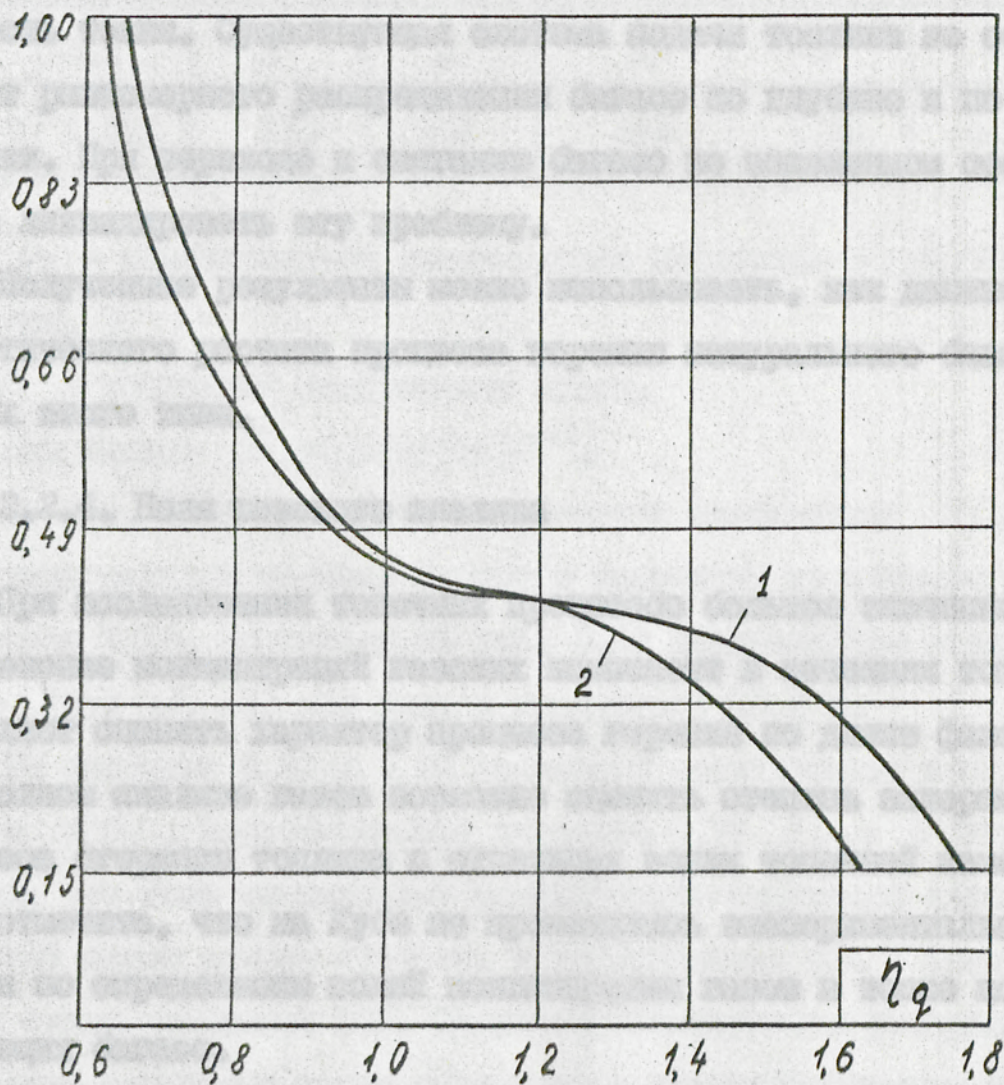


Рис.2.19. Изменение коэффициента неравномерности теплового потока.

1 - при $D = 3,89 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$; 2 - при $D = 4,75 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$

$$RO_2 = \frac{21 - O_2}{1 + \beta} \quad \%$$

се образовании отложений в топке котлов, сжигающих багасо, практически не существует.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что неравномерное горение из решетки вызывает большую неэкономичность топки. Существующая система подачи топлива не обеспечивает равномерного распределения багасо по глубине и по ширине решетки. При переходе к сжиганию багасо во взвешенном состоянии можно ликвидировать эту проблему.

Полученные результаты можно использовать, как данные для теоретического расчета процесса горения натурального багасо в топках этого типа.

2.2.4. Поля газового анализа

При исследовании топочных процессов большое значение имеет определение концентраций газовых компонент в сечениях топки, что позволяет оценить характер процесса горения по длине факела. При полном анализе газов возможно оценить степень завершенности процесса сгорания топлива в отдельных зонах топочной камеры. Надо отметить, что на Кубе не проводились экспериментальные работы по определению полей концентрации газов в топке котлов, сжигающих багасо.

С целью исследования изменения концентрации газов (CO_2 , O_2) в топочной камере котла, сжигающего багасо, нами были проведены испытания на котле "Рето" CV -25-18 на сахарном заводе "Лос Рейнальдос". Во время испытаний регистрировались основные параметры котла (табл.2.7).

Как известно, при полном сгорании топлива, используя топливный коэффициент Бунте β можно записать:

$$RO_2 = \frac{21 - O_2}{1 + \beta} \quad , \quad \% \quad , \quad (2.16)$$

Таблица 2.7

Основные характерные параметры котла при испытании

D_{nn}	P_{nn}	T_{nn}	$T_{пв}$	T_{yx}	L''	$\frac{Q_{ка}}{Q_{ка ном}}$
кг/с	МПа	К	К	К	-	-
5,17	1,275	593	383	464	1,22	0,74

где O_2 — относительная концентрация кислорода в продуктах сгорания, %

β — топливный коэффициент Бунте.

Для багасо $\beta = 2,245495 \times 10^{-2}$.

На рис. 2.20 приведены зависимости содержания RO_2 в продуктах полного горения багасо и древесины полученные по зависимости 2.16. Как видно из рис. 2.20 максимальное количество RO_2 (при $L = 1$) для багасо составляет 20,5 %.

На рисунках 2.21 и 2.22 приведены поля концентрации кислорода и RO_2 , полученные при нагрузке 0,74 $D_{ном}$. Можно заметить, что зона минимальной концентрации кислорода находится у задней стенки камеры сгорания и не превышает 4%. У фронтальной стенки топки достигает 16%. Такая неравномерность распределения кислорода по объему топки объясняется неравномерностью распределения топлива на решетке. Зона максимального расхода окислителя на горение совпадает с зоной, где количество топлива наибольшее и здесь не достигает максимального значения концентрации RO_2 (см. рис. 2.22). Нужно отметить, что при таком аэродинамическом режиме в топке появляются зоны с недостаточным содержанием кислорода и, следовательно, ухудшается процесс горения, что приводит к появлению потерь тепла с химическим недогором до 4%.

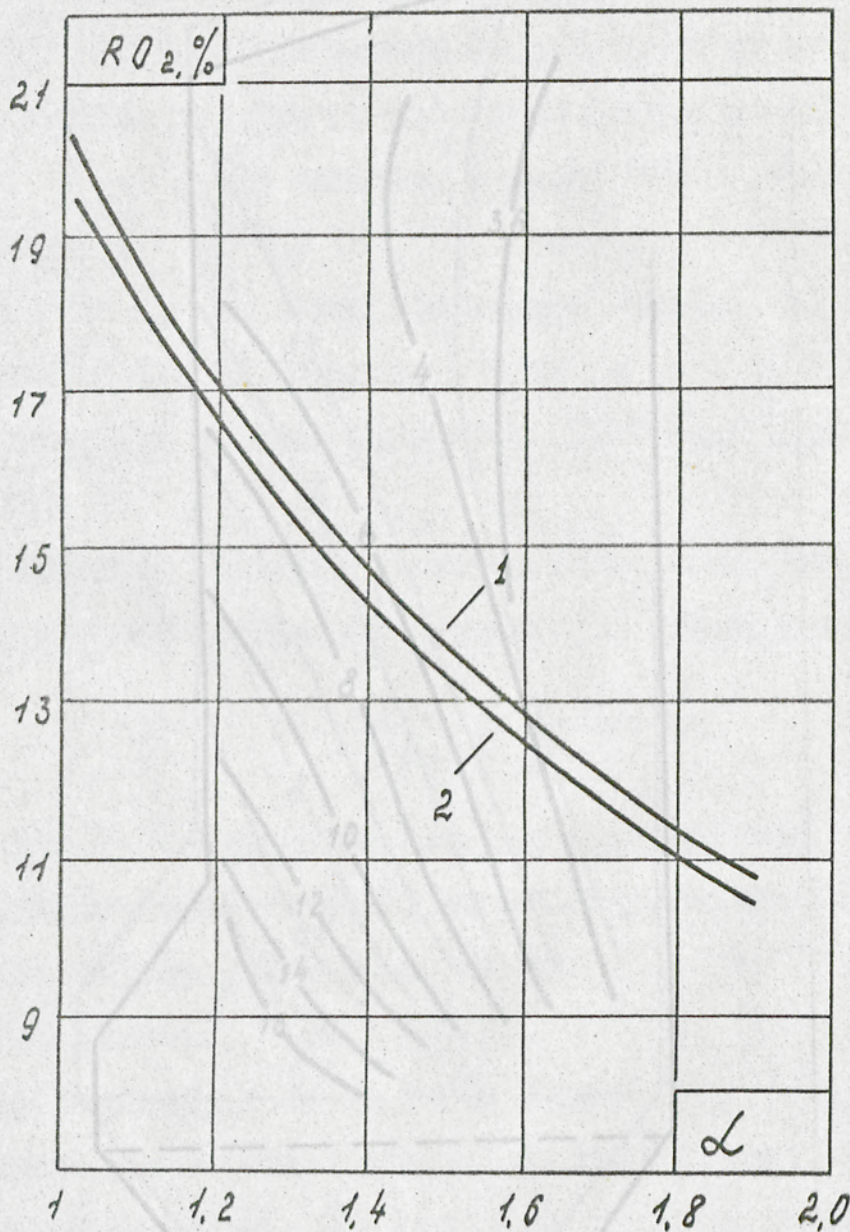


Рис.2.20. Зависимость содержания RO_2 в продуктах полного горения от коэффициента избытка воздуха.

I - багасо; 2 - мягкая древесина.

Рис.2.21. Поле концентрации кислорода в воздухе Рето

при $D = 5.17 \frac{кг}{с}$ ($0.74 \frac{л}{мин}$).

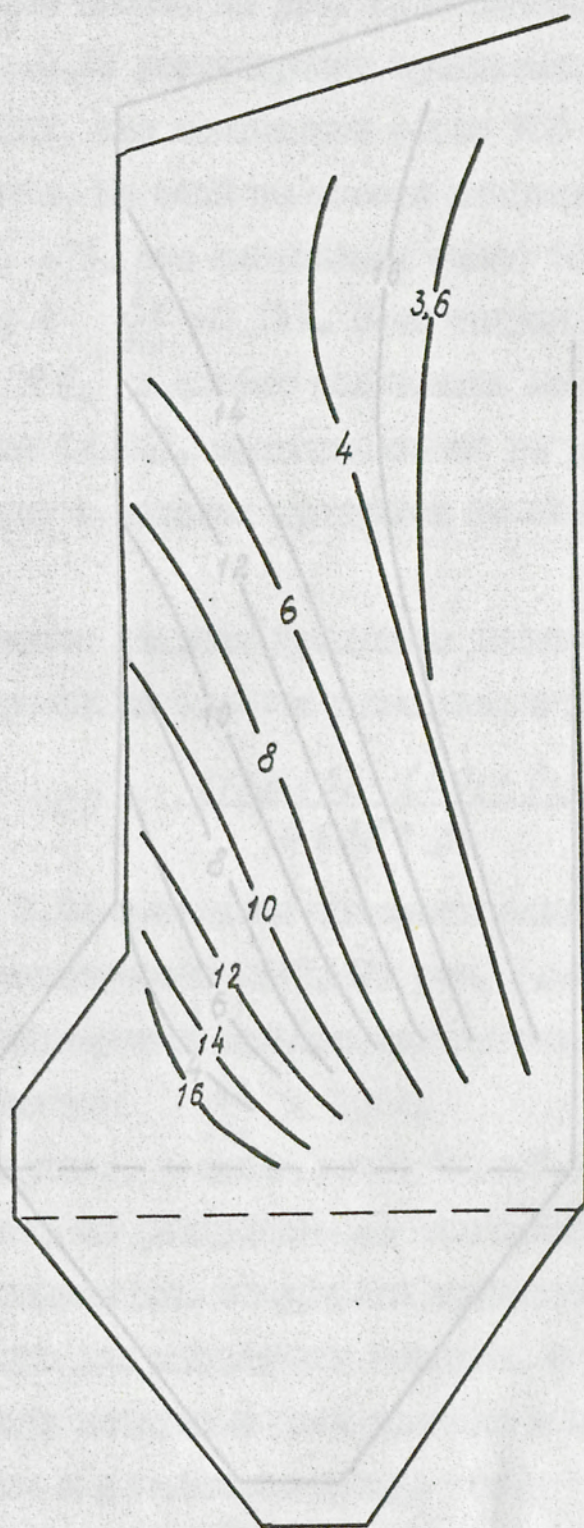


Рис. 2.21. Поле концентрации кислорода котла Рето
при $D = 5,17 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ($0,74 D_{\text{ном}}$).

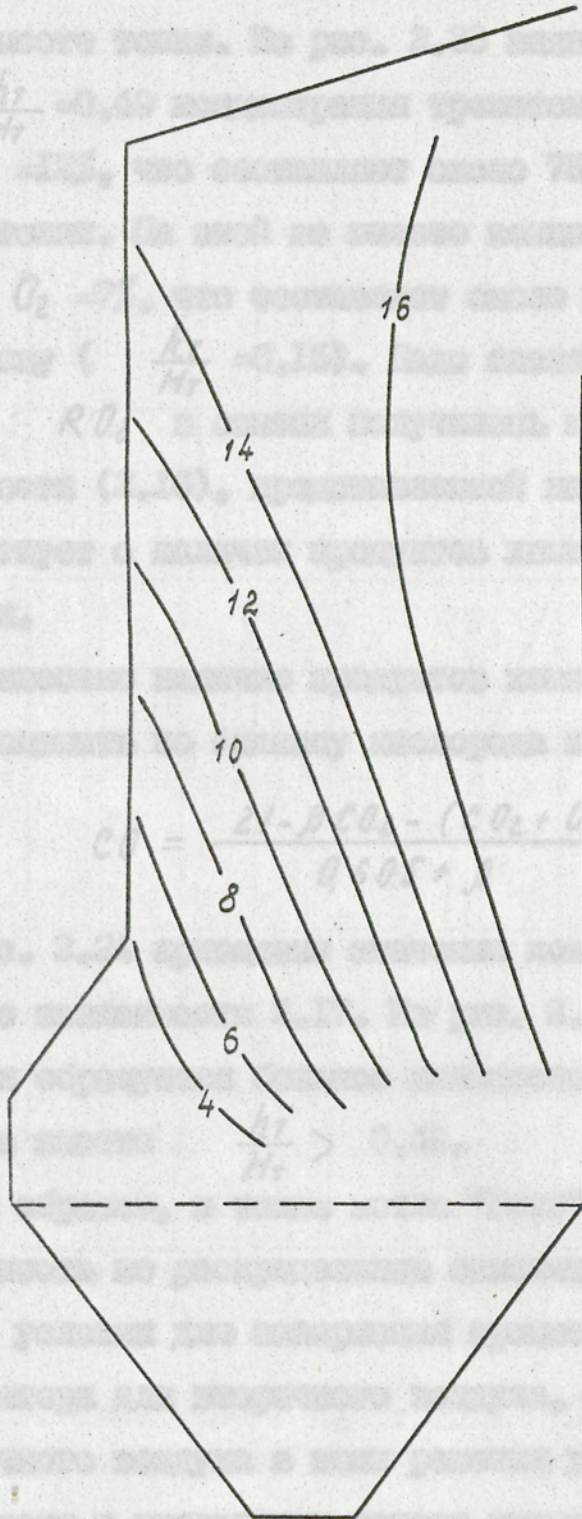


Рис. 2.22. Поле концентрации RO_2 котла Рето
при $D = 5,17 \frac{кг}{с}$ ($0,74 D_{ном}$).

На рис. 2.23 приведены средние значения концентрации RO_2 и O_2 по высоте топки. Из рис. 2.23 видно, что на относительной высоте $\frac{h_T}{H_T} = 0,49$ концентрация трехатомных газов имеет значение $RO_2 = 12\%$, что составляет около 75% от ее значения на выходе из топки. На этой же высоте концентрация кислорода имеет значение $O_2 = 7\%$, что составляет около 70% от ее значения на входе в топку ($\frac{h_T}{H_T} = 0,15$). Надо сказать, что значения концентрации RO_2 в опытах получались меньше, чем рассчитанные по зависимости (2.16), представленной на рис. 2.20. Этот факт свидетельствует о наличии продуктов химической неполноты сгорания в газах.

Как известно наличие продуктов химической неполноты сгорания можно оценить по балансу кислорода и углекислоты:

$$CO = \frac{21 - \beta CO_2 - (CO_2 + O_2)}{0,605 + \beta} \quad (2.17)$$

На рис. 2.24 приведены значения концентрации CO рассчитанные по зависимости 2.17. Из рис. 2.24 видно, что в нижней части топки образуется большое количество CO часть которой догорает на высоте $\frac{h_T}{H_T} > 0,49$.

Таким образом, в топке котла "Рето" существует большая неравномерность по распределению окислителя, что создает неблагоприятные условия для завершения процесса горения. Установка вентилятора для вторичного воздуха, а также увеличение подачи первичного воздуха в зоны решетки у задней стены топки может привести к уменьшению потери тепла q_3 , а следовательно, к увеличению КПД котла. Полученные данные можно использовать для расчета горения частиц багасо в этой топке.

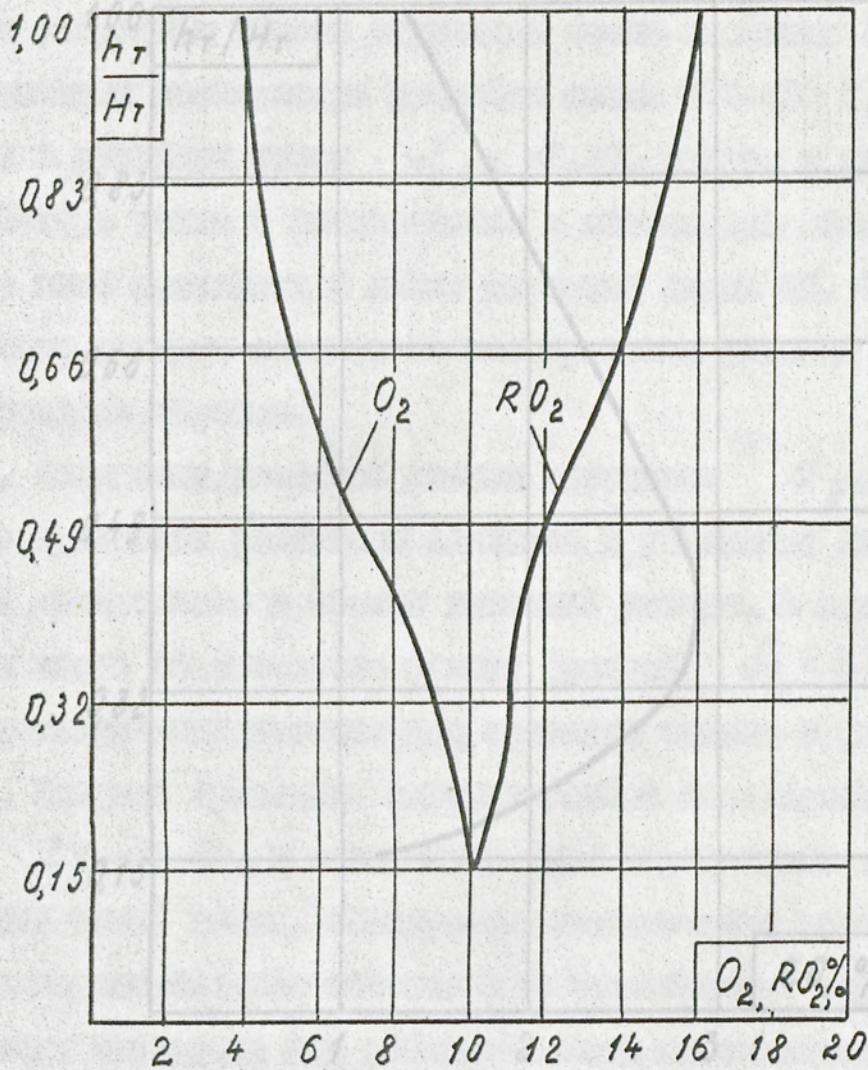


Рис.2.23. Изменение концентрации O_2 и RO_2 по высоте топки котла Рето при $D = 5,17 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ($0,74 D_{\text{ном}}$),

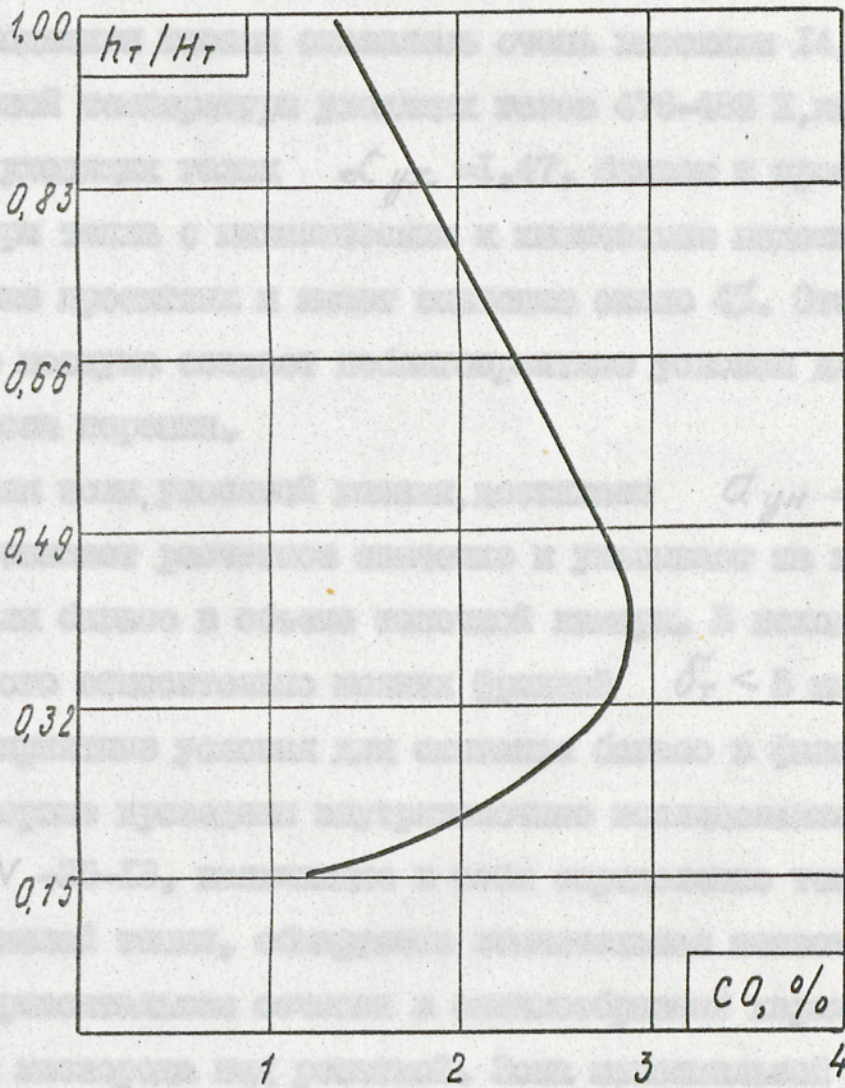


Рис.2.24. Изменение концентрации CO по высоте топки котла Рето при $D = 5,17 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ($0,74 D_{\text{ном}}$).

2.3. Выводы по главе

1. Впервые проведены испытания котла "Рето" CV -25-18 с целью определения его КПД; он составил 74,25-75,88% в интервале изменения нагрузки (0,60-0,63) $\eta_{ном}$; при этом потери тепла с уходящими газами оказались очень высокими 14,15-15,45% из-за высокой температуры уходящих газов 476-489 К, хотя избыток воздуха в уходящих газах $\alpha_{yx} = 1,47$, близок к проектному 1,54. Потери тепла с механическим и химическим недожогом так же немалого вые проектных и имеют значение около 4%. Отсутствие вторичного воздуха создает неблагоприятные условия для надолой-ного процесса горения.

2. Доля золи, уносимой газами, достигает $\alpha_{yn} = 0,82$, что немалого превышает расчетное значение и указывает на горение большой доли сагасо в объеме топочной камеры. В исходном сагасо имеется много относительно мелких фракций $\delta_r < 5$ мм, что создает благоприятные условия для сжигания сагасо в факеле.

3. Впервые проведены внутритопочные исследования котла "Рето" CV -25-18, включающие в себя определение температурных и газовых полей топки, обнаружена значительная неизоотермичность топки в горизонтальном сечении и скачкообразный характер распределения кислорода над решеткой. Зона максимальной температуры, более 1370 К - ядро факела - находится в нижней задней части камеры сгорания. Уменьшение концентрации кислорода по высоте топки указывает на то, что большое количество сагасо сгорает в топочном объеме, отсюда вытекает необходимость перейти к сжиганию этого материала во взвешенном состоянии.

4. Температура газов на выходе из топки, полученная методом обратного баланса, оказалась равна 1187 К (при $\frac{Q_{ка}}{Q_{ка ном}} = 0,8633$), что на 44 К выше проектной. Коэффициент тепловой

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ, АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАСО

3.1. Теплофизические и аэродинамические характеристики багасо

3.1.1. Физические характеристики багасо

Багасо — полидисперсный материал, размеры частиц которого, по сравнению с другими материалами, варьируются в больших пределах. Если взять пробу интегрального багасо и рассмотреть в микроскоп, то можно отметить различия по форме и структуре две основные группы частиц: длинные и узкие, короткие и толстые.

Длинные и узкие частицы состоят, в основном, из фибры, тогда как короткие и толстые — из сердцевин тростника. Можно отметить, что большинство частиц багасо имеют призматическую форму в виде параллелепипеда. Полезнообразно багасо классифицировать по следующим размерам, предложенным в работе /52/:

1. частицы с поперечным размером больше $5 \cdot 10^{-3}$ м, образующие, в основном, из волокон;
2. частицы с поперечным размером от $0,3 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ м, называемые "багасильо" и образующие смесь волокон и пылинок;
3. частицы диаметром менее $0,3 \cdot 10^{-3}$ м, называемые "неольо" и образующие, в основном, пыль.

Различные авторами изучали гранулометрический состав багасо /53,54,55/, который зависит от процесса дробления тростника. На рис. 3.1 приведены результаты анализа фракционного состава некоторых проб багасо, взятых на сахарных заводах Кампио Снелдгерс, Сальвадор Росалес, Пабло Норвета и Лос Рейнальдес. Для средних значений масс багасо на каждом сите (ΔR_i) и по среднему диаметру частицы (δ_{τ}) была определена функция для расчета полного остатка на сите $R(\delta_{\tau})$

$$R = \exp[-79.93 \delta_r^{0.19}]$$

$$\delta_r = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}, \quad \text{м};$$

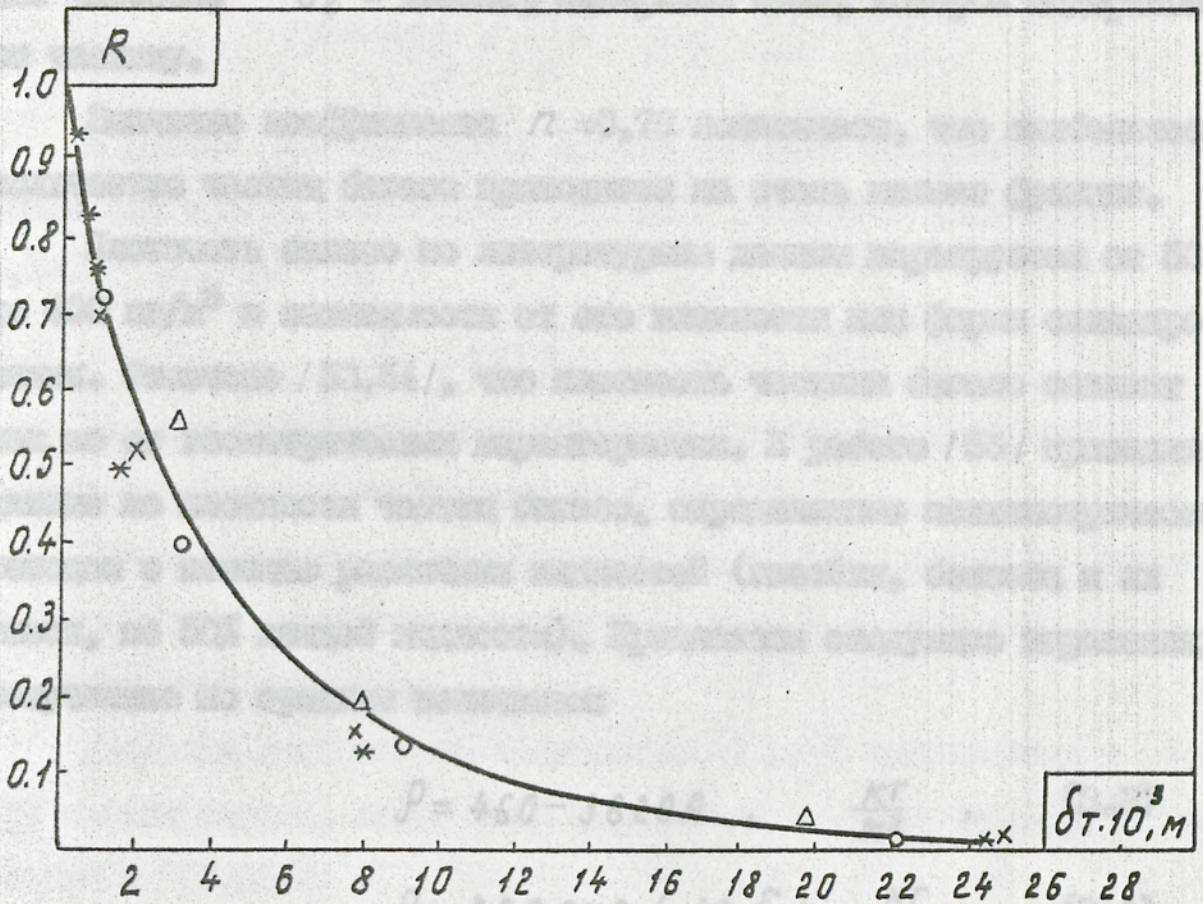


Рис.3.І. Распределение частиц багасо по фракциям /55/

x - Камило Сиенфuegos ; * - Пабло Нориега;
 Δ - Сальвадор Росалес; o - Лос Реиналдос.

$$R = \exp [- 79,95 \delta_T^{0,79}] \quad ; \quad (3.1)$$

где

$$\delta_T = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \quad , \quad \text{м} \quad ; \quad (3.2)$$

δ_1 — диаметр отверстий последнего сита, через которое проходит частица; δ_2 — диаметр отверстий сита, которое задерживает частицу.

Значение коэффициента $n = 0,79$ показывает, что наибольшее количество частиц багассо приходится на очень мелкие фракции.

Плотность багассо по литературным данным варьируется от 50 до 400 кг/м³ в зависимости от его влажности или формы сгущения. Отмечено [53,54], что плотность частицы багассо зависит так же от геометрических характеристик. В работе [53] приводятся данные по плотности частиц багассо, определенные негеометрическим методом с помощью различных жидкостей (газолин, бензола и их смеси, по 50% каждой жидкости). Предложены следующие выражения, полученные по средним величинам:

$$\rho = 460 - 3620A \quad , \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad , \quad (3.3)$$

$$\rho = 360 \exp (-32 \delta_T) \quad , \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad , \quad (3.4)$$

где A — длина частицы, м; δ_T — расчетный диаметр по выражению 3.2, м.

Брицман и его соотрудники [54] получили зависимости плотности частиц багассо от объема частиц, рассчитанного по трем характерным размерам: длине (A), ширине (B), толщине (C). Частицы были классифицированы на две группы; первая — частицы, имеющие большую величину отношения длины к ширине ($A/B > 4,8$), и вторая — частицы у которых эта величина меньше $A/B < 3,3$.

Это позволило Британу предложить следующие зависимости (они представлены в спотом (3.5)):

- для длинных частиц

$$\rho = 61,256 \delta_T^{-0,22}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

- для коротких частиц

$$\rho = 40,74 \delta_T^{-0,13}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

(3.5)

В работе /52/ по методу Эргли получено аналогичное выражение для частиц багасильо и мюльо в диапазоне диаметров $0,1 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$ м:

$$\rho = 3,445 \delta_T^{-0,543}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad (3.6)$$

Все эти выражения были получены для частиц помошенного багасо с начальной влажностью от 8 до 10%.

Таким образом, можно констатировать, что плотность багасо уменьшается с увеличением размера частиц, т.к. при этом увеличивается количество пор.

Удельная поверхность (отношение внешней поверхности к объему) частиц багасо, может быть определена по зависимостям, полученным в /52,54/:

- для длинных частиц

$$S = 79,35 \delta_T^{-0,64}, \quad \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3},$$

- для коротких частиц

$$S = 29,39 \delta_T^{-0,76}, \quad \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}$$

- для багасильо и мюльо

$$S = 3,6334 \times 10^{-4} \delta_T^{-2,379}, \quad \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}$$

(3.7)

Уменьшение удельной поверхности при увеличении диаметра (рис.3.2) объясняется тем, что объем частицы увеличивается сист-

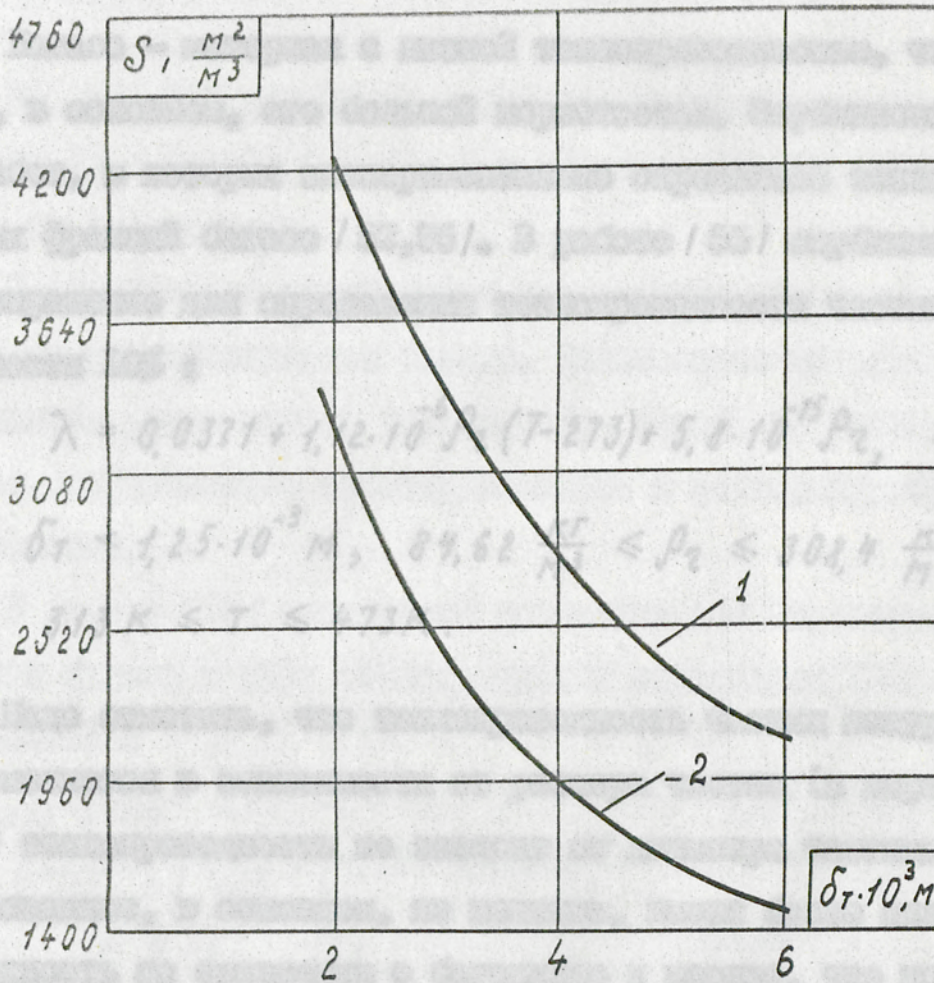


Рис. 3.2. Изменение удельной поверхности частиц натурального багасо.

1 — для длинных частиц; 2 — для коротких частиц

рее, чем внешняя поверхность. С другой стороны для длинных частиц удельная поверхность больше, чем для порогинки (для данного диаметра) (рис. 3.2) из-за большой внешней поверхности перемык.

3.1.2. Теплофизические характеристики багасо

Багасо — материал с низкой теплопроводностью, что объясняется, в основном, его большой пористостью. Опубликовано несколько работ, в которых экспериментально определена теплопроводность разных фракций багасо [52, 55]. В работе [55] опубликовано следующее выражение для определения теплопроводности частиц багасо при влажности 10% :

$$\lambda = 0,0377 + 1,12 \cdot 10^{-6} \rho_2 (T - 273) + 5,8 \cdot 10^{-15} \rho_2, \quad \frac{B_T}{MK}; \quad (3.8)$$

для

$$\delta_T < 1,25 \cdot 10^{-3} M, \quad 84,62 \frac{KГ}{M^3} \leq \rho_2 \leq 308,4 \frac{KГ}{M^3},$$

$$313 K \leq T \leq 473 K.$$

Надо отметить, что теплопроводность частиц натурального багасо меняется в зависимости от размера частиц (в выражении (3.8) теплопроводность не зависит от диаметра частицы). Частицы, образованные, в основном, из волокон, имеют более низкую теплопроводность по сравнению с багасилью и мезью, что позволяет использовать волоконно багасо в качестве теплоизоляционного материала (см. табл. 1.3).

Бойсан [52] предлагает следующее выражение для определения температуропроводности слоя багасилью и мезью:

$$\text{— для диапазона } 293 K \leq T \leq 353 K; 0\% \leq W \leq 30\% ;$$

$$50 \frac{KГ}{M^3} \leq \rho_{cl} \leq 110 \frac{KГ}{M^3} ;$$

$$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-7} + 3,3 \cdot 10^{-15} (1,87 - 460)^3 - \frac{4,13 \cdot 10^{-7}}{W} + 9,6 \cdot 10^{-16} \rho_{cl}, \quad \frac{M^2}{C}; \quad (3.9)$$

В работе / 55 / предложено определять температуропроводность частиц сагасо для $313 \text{ K} \leq T \leq 373 \text{ K}$; $84 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \leq \rho \leq 308 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\delta_T < 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $W = 10\%$ по выражению:

$$\alpha = 3,1 \cdot 10^{-6} (T - 273)^{0,184} \rho^{-0,63}, \quad \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \quad (3.10)$$

На рис. 3.3 показаны кривые температуропроводности слоя (кривая 1) и частиц (кривая 2 и 3) натурального сагасо в зависимости от температуры.

В публикациях практически нет экспериментальных данных по определению теплоемкости сагасо. Большинство исследователей предлагает рассчитывать теплоемкость сагасо по экспериментальным данным коэффициентов теплопроводности и температуропроводности и плотности.

В работе / 55 / предложены уравнения для определения теплоемкости сагасо в двух температурных интервалах (273-673)К и (673-1473)К:

$$C_{273-673\text{K}} = 0,83(1 + 0,008V^c) \left[1 + 0,2 \left(\frac{T-273}{100} \right) - 0,0033 \times \left(\frac{T-273}{100} \right)^3 \right] \frac{B^p}{100} + [0,78 + 0,00226 (T-273)^{0,66}] \frac{A^p}{100} + 4,187 \frac{W^p}{100}, \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad (3.11)$$

$$C_{673-1473} = C_{673} + 0,00403(T-673) \frac{B^c}{100} + 0,00226 \times (T-273)^{0,66} \frac{A^c}{100}, \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad (3.12)$$

где B^c — органическая масса топлива, %;

A^c — зольность топлива, %.

Расчеты теплоемкости частиц сагасо по уравнению (3.11) по-

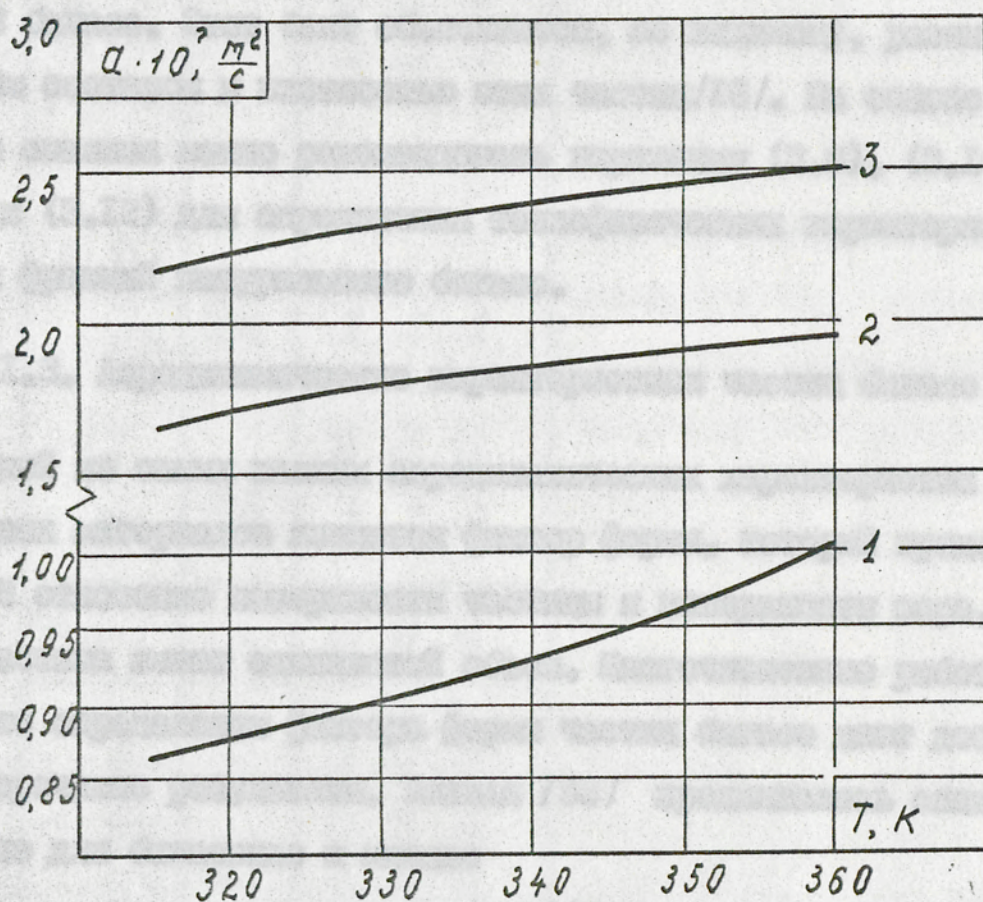


Рис. 3.3. Зависимость α от T для багасо ($W = 10\%$).
по формуле 3.9 по формуле 3.10

1. $\rho = 100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; 2. $\rho = 300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

3. $\rho = 200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$$C_2 = 4.39 \frac{\delta_1}{\omega_{10}} \frac{P_2 - P_1}{P_1}$$

казывают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными (см. табл. 3.1).

Как уже было отмечено, экспериментальные значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности для багасильо и мезольо отличаются от значений этих коэффициентов для других фракций багасо. Этот факт объясняется, по видимому, разным химическим составом и плотностью этих частиц /16/. На основе проведенного анализа можно рекомендовать выражения (3.8), (3.10), (3.11) и (3.12) для определения теплофизических характеристик крупных фракций натурального багасо.

3.1.3. Аэродинамические характеристики частиц багасо

Одной из самых важных аэродинамических характеристик дисперсионных материалов является фактор формы, который представляет собой отношение поверхности частицы к поверхности шара, когда шар и частица имеют одинаковый объем. Многочисленные работы /52, 53, 54/ по определению фактора формы частиц багасо дают достаточно разноречивые результаты. Бонзан /52/ предложил следующее выражение для багасильо и мезольо

$$f = 2,4058 \sigma_T^{0,55} \quad (3.13)$$

Фришман /54/ получил более простые линейные зависимости для длинных частиц.

$$\left. \begin{aligned} f &= 0,48 + 2,7 \sigma_T, \\ \text{и для коротких частиц} \\ f &= 0,68 + 0,84 \sigma_T. \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Пачеко /53/ получил величины коэффициента сопротивления фракции частиц багасо, рассчитанные по формуле (3.15) исходя из различных фракций с влажностью от 3,3 до 45%.

$$C_z = 4,39 \frac{\sigma_T}{\omega_{\text{в.т.}}^2} \frac{\rho_z - \rho_B}{\rho_B} \quad (3.15)$$

Таблица 3.1

Теплофизические характеристики багаса

T	C_I опытные данные / 55/	α по форму- ле (3.10)	λ по форму- ле (3.8)	ρ	$C_{II} = \frac{\lambda}{\rho \alpha}$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	C_{III} по форму- ле (3.11)	$\frac{C_{II}}{C_I}$	$\frac{C_{III}}{C_I}$
K	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\frac{\text{кВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	-	-
320	1,248	$2,2355 \times 10^{-7}$	$0,05923 \times 10^{-3}$	200	1,3247	1,70	1,06	1,36
335	1,2706	$2,3524 \times 10^{-7}$	$0,06259 \times 10^{-3}$	200	1,3303	1,74	1,05	1,36
360	1,3070	$2,5037 \times 10^{-7}$	$0,06819 \times 10^{-3}$	200	1,3617	1,80	1,04	1,37

где $\omega_{\text{вн}}$ — скорость вращения фракции багасо, $\frac{1}{\text{с}}$;

ρ_2 , $\rho_в$ — плотности частиц и воздуха, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Результаты расчета по выражению (3.15) показывают, что коэффициент сопротивления может изменяться более чем в 3 раза от 1,4 до 3,23 при изменении $Re = 600-22$.

В расчетах процессов горения частиц багасо важным моментом является определение скорости частиц по отношению к газовому потоку. Существуют многочисленные экспериментальные работы [53, 54, 55, 56], посвященные определению скорости вращения отдельных групп фракций частиц багасо при температуре потока, близкой к комнатной. Так в работе [57] экспериментальным путем получены значения скоростей вращения 6,15–3,8 м/с для фракции багасо $4 \cdot 10^{-3} \text{ м} \leq \sigma_T \leq 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ при температуре воздуха 500 К. Пачеко [53] на основании собственных экспериментальных данных дал зависимость скорости вращения от влажности и размера частиц:

$$\omega_{\text{вн}} = 1,12 W^{0,14} \sigma_T^{0,5} \quad (3.16)$$

Понсе и его сотрудники [58] поставили обширные эксперименты и определяли скорости вращения фракций багасо с длинными и короткими частицами при различных температурах потока и начальной влажности багасо:

— для длинных частиц

$$\omega_{\text{вн}} = 1,667 \sigma_T^{0,245} \left(1 + \frac{W}{\rho_2}\right)^{0,5} ; \quad (3.17)$$

— для коротких частиц

$$\omega_{\text{вн}} = 1,262 \sigma_T^{0,305} \left(1 + \frac{W}{\rho_2}\right)^{0,5} ;$$

где W — начальное содержание влаги в пересчете на сухую массу,

В работе [56] показано, что для фракций багасо с диаметром $0,157 \cdot 10^{-3} \text{ м} \leq \sigma_T \leq 1,595 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и скорость вращения на-

ходится между 0,32 и 1,192 м/с.

Необходимо отметить, что все рассмотренные выше экспериментальные работы проведены для группы частиц одной и той же фракции, что дает некоторое интегральное значение по скорости витания. Однако полностью отсутствуют работы по определению скорости витания одиночной частицы сагасо. Как было уже отмечено, при анализе процесса горения сагасо во ^{ВЗВ} III состоянии необходимо рассматривать прежде всего движение одиночной частицы топлива.

С этой целью нами был проведен ряд экспериментов на специально созданном на Кубе стенде (рис.3.4). Он состоит из горизонтального воздуховода, в котором измеряется расход воздуха напорной трубкой Прандтля; акриловой камеры витания, через которую наблюдается движение частицы при определенном расходе. Расход воздуха можно регулировать с помощью заслонки 4.

Толщина и ширина частицы измеряются в трех точках (крайняя правая, центр, крайняя левая) под микроскопом. Результат для каждого размера усредняется. Затем определяют все частицы и исходя из предположения, что частица — параллелепипед, вычисляется плотность для каждой частицы. В результате обработки данных более 500 частиц было получено аппроксимирующее выражение:

$$\rho = \frac{0,422 \times 10^{-5}}{ABC} + 265,78 \quad \cdot \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad ; \quad (3.18)$$

где A, B, C — характерные размеры частицы, м.

Получен коэффициент корреляции 0,84. По формуле (3.18) можно определять плотность одной частицы сагасо исходя из ее характерных размеров. Значения плотности, рассчитанные по выражениям (3.4) и (3.18) практически совпадают в интервале

$$4 \times 10^{-3} \leq \sigma_T \leq 10^{-2} \text{ м} \quad (\text{рис.3.5}). \text{ Для определения характерных}$$

доли; 3 — камера; 3 — камера витания.

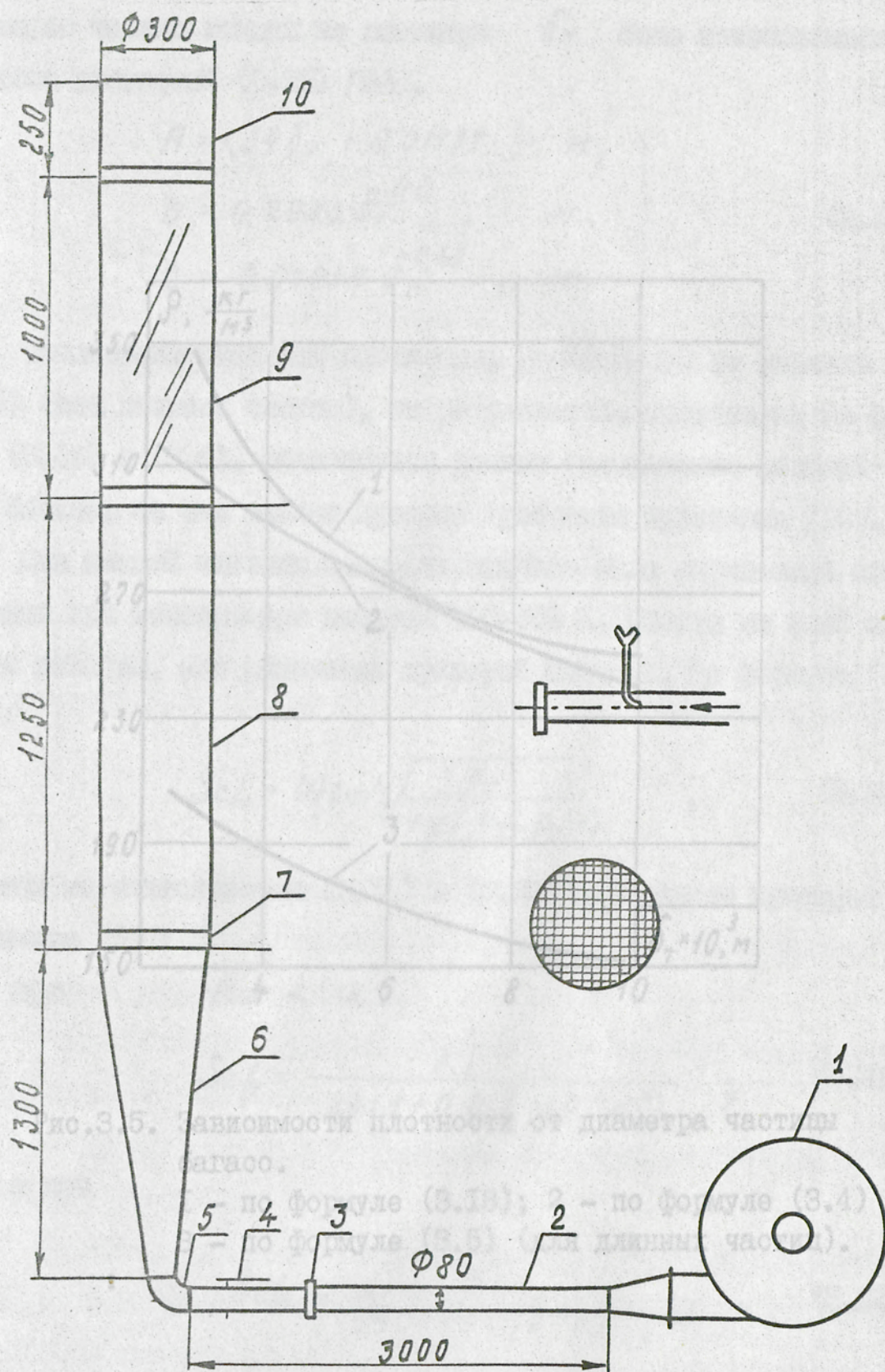


Рис.3.4. Установка для определения скорости витания
 1 - вентилятор; 2, 6, 7, 8, 10 - воздухопровод;
 3 - место установки микроманометра; 4 - заслонка; 5 - колено; 9 - камера витания.

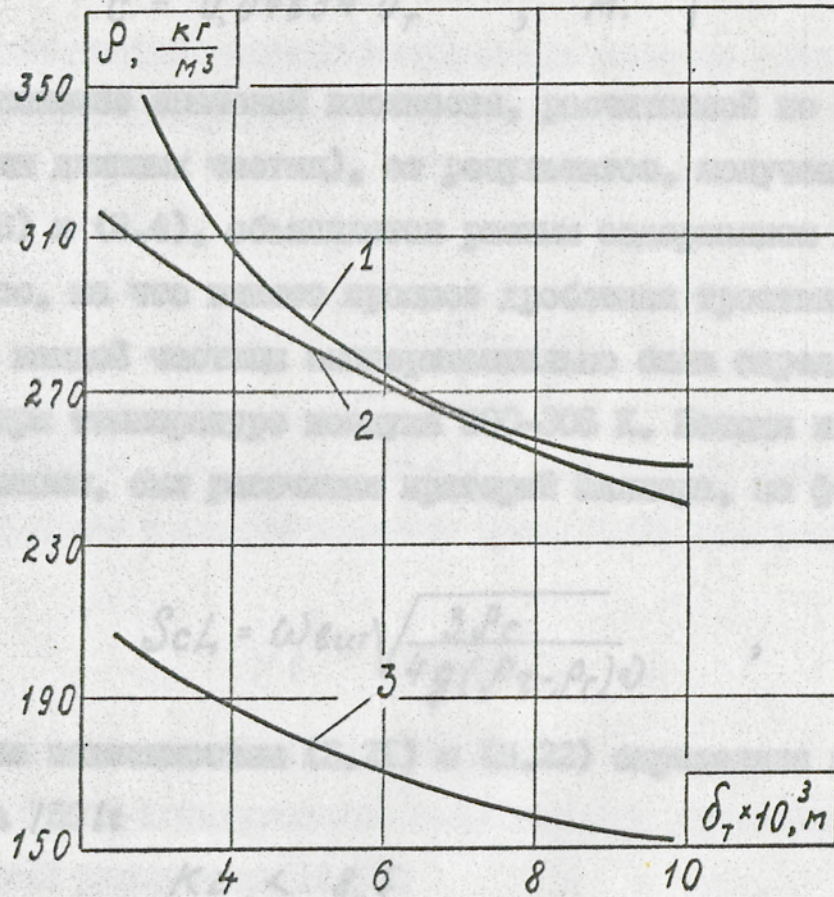


Рис.3.5. Зависимости плотности от диаметра частицы багасо.

1 — по формуле (3.18); 2 — по формуле (3.4)
3 — по формуле (3.5) (для длинных частиц).

размеров частиц исходя из диаметра δ_T была использована система уравнений (3.19) /54/.

$$\left. \begin{aligned} A &= 1,59 \delta_T + 0,01137, \quad \text{м}, \\ B &= 0,2085 \delta_T^{0,8}, \quad \text{м}, \\ C &= 0,04634 \delta_T^{0,65}, \quad \text{м}. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Отклонение значений плотности, рассчитанной по формуле (3.5) (для длинных частиц), от результатов, полученных по формулам (3.18) и (3.4), объясняется разным содержанием волокна частиц багасо, на что влияет процесс дробления тростника /16/.

Для каждой частицы экспериментально была определена скорость витания при температуре воздуха 300–306 К. Исходя из этой скорости витания, был рассчитан критерий Шиллера, по формуле (3.20) /59/:

$$Sc_L = \omega_{\text{вир}} \sqrt{\frac{3 \rho_r}{4 g (\rho_z - \rho_r) v}}, \quad (3.20)$$

а затем по зависимостям (3.21) и (3.22) определяли критерии Кирпичева /59/:

при $K_i < 8,5$

$$Sc_L = \frac{K_i^2}{24(1 + 0,955 \times 10^{-3} K_i^4)}; \quad (3.21)$$

и при

$$Sc_L = \frac{K_i^2}{24(1 + 57 \cdot 10^{-3} K_i^{1,15})^{1,3}}, \quad (3.22)$$

Исходя из числа Кирпичева, вычислялся аэродинамический эквивалентный диаметр $\delta_{\text{аэр}}$ частицы багасо:

$$\delta_{\text{АЭР}} = \frac{K_i}{\sqrt[3]{\frac{4g(\rho_v - \rho_r)}{3\rho_r v^2}}} \quad (3.23)$$

Затем для каждой частицы вычисляются диаметр эквивалентного по отношению поверхности и объему шара / 60 /:

$$\delta_{F/V} = \frac{3}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{C}} \quad ; \quad (3.24)$$

Величины $\delta_{\text{АЭР}}$ и $\delta_{F/V}$ для каждой частицы приведены на графике и скоррелированы (рис. 3.6) следующим образом:

$$\delta_{\text{Э}}^a = 0,193 \delta_{F/V} \quad ; \quad (3.25)$$

(Коэффициент корреляции равен 0,94).

Во время экспериментов были изучены более 200 частиц со средней влажностью 14 %.

Для обработки экспериментальных данных была составлена программа на языке Бейсик.

В приложениях 2 и 3 приведены основные результаты расчетов для 76 частиц.

Обработка опытных данных позволила определить выражение для расчета "эквивалентного" диаметра шара, аэродинамически подобногo частице:

$$\sigma_3^a = \frac{2.522}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{C}}$$

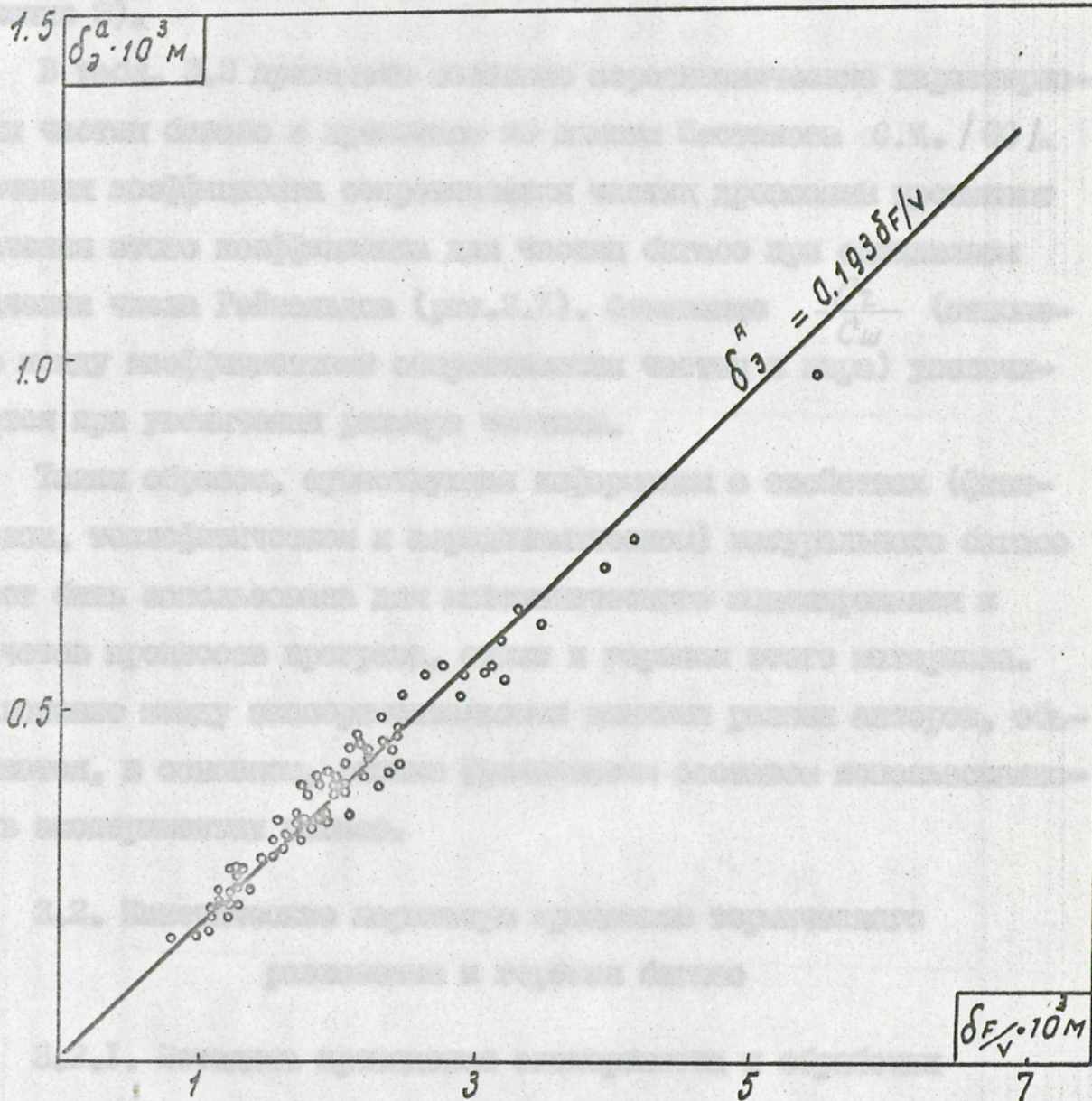


Рис.3.6. Зависимость σ_3^a от $\sigma_{F/v}$ для частиц натурального багасо.

$$\delta_{\varepsilon}^a = \frac{0,579}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{C}}, \quad M. \quad (3.26)$$

Расчет скорости витания исходя из диаметра δ_{ε}^a показывает удовлетворительное совпадение с опытными данными (см. приложение 3).

В табл. 3.2 приведены основные аэродинамические характеристики частиц багассо и древесины по данным Пестакоса С.М. / 60 /. Значения коэффициента сопротивления частиц древесины превышают значения этого коэффициента для частиц багассо при одинаковом значении числа Рейнольдса (рис. 3.7). Отношение $\frac{C_z}{C_w}$ (отношение между коэффициентами сопротивления частиц и шара) увеличивается при увеличении размера частицы.

Таким образом, существующая информация о свойствах (физическом, теплофизическом и аэродинамическом) натурального багассо может быть использована для математического моделирования и расчетов процессов прогрева, сушки и горения этого материала. Отклонение между экспериментальными данными разных авторов, объясняется, в основном, разным фракционным составом используемого в экспериментах багассо.

3.2. Кинетические параметры процессов термического разложения и горения багассо

3.2.1. Методика проведения эксперимента и обработки опытных данных

Для расчетов процессов горения термической переработки багассо необходимо знание кинетических параметров этих процессов: энергии активации (E), предэкспоненциального множителя (K_0)

Таблица 3.2

Основные аэродинамические характеристики частиц балласта и дрозосины

Обозначение	Размерность	Балласт					Дрозосина / 60/				
A	м	0,01534	0,00193	0,02329	0,02727	0,006	0,005	0,007	0,004		
B	м	0,00173	0,003	0,0042	0,0052	0,0015	0,0025	0,0025	0,002		
C	м	0,00094	0,0014	0,00193	0,0023	0,001	0,001	0,001	0,002		
$\delta_{F/V}$	м	0,0018	0,0027	0,0037	0,0045	0,0016	0,0018	0,00194	0,0024		
δ_a	м	$0,34 \cdot 10^{-3}$	$0,53 \cdot 10^{-3}$	$0,72 \cdot 10^{-3}$	$0,88 \cdot 10^{-3}$	$0,62 \cdot 10^{-3}$	$0,70 \cdot 10^{-3}$	$0,73 \cdot 10^{-3}$	$0,90 \cdot 10^{-3}$		
Ki	-	9,06	12,66	16,78	20,21	16,2	18,33	19,2	23,7		
Sch	-	1,946	2,96	4,03	4,82	3,25	3,9	4,1	5		
ω_{but}	м/с	0,83	1,14	1,5	1,77	1,44	1,72	1,81	2,21		
Re	-	17,62	37,55	67,63	97,26	55,35	75,57	82,47	124,31		
Cz	-	2,4	1,44	1,03	0,87	1,54	1,23	1,15	0,97		
$C_{\omega} = \frac{24}{Re} + \frac{4}{V Re}$	-	2,31	1,29	0,84	0,65	0,97	0,77	0,73	0,55		
$\frac{Cz}{C_{\omega}}$	-	1,03	1,11	1,23	1,33	1,53	1,59	1,57	1,76		

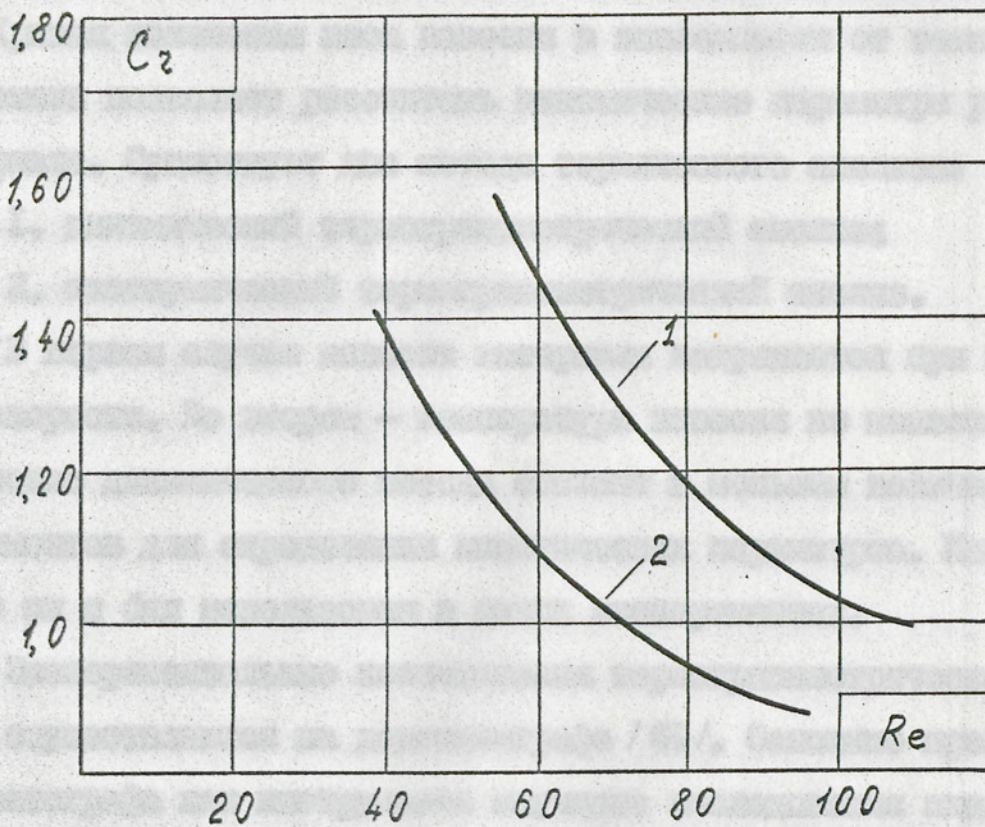


Рис.3.7. Зависимость C_z от Re

1 - для частиц древесины /60/ ;

2 - для частиц багасо.

и порядка реакции (n). Особенный интерес вызывает изучение процесса выхода летучих из балласта.

В настоящее время самым распространенным методом для определения кинетических параметров термического разложения и горения разных материалов является термогравиметрический анализ (ТГА). Он заключается в регистрации изменения веса определенной навески материала, подвергнутой нагреву в определенных условиях. Кривая изменения веса навески в зависимости от температуры и времени позволяет рассчитать кинетические параметры разложения материала. Существуют два метода термического анализа:

1. динамический термогравиметрический анализ;
2. изотермический термогравиметрический анализ.

В первом случае навеска материала нагревается при постоянной скорости. Во втором — температура навески не меняется. Преимущество динамического метода состоит в меньшем количестве экспериментов для определения кинетических параметров. Именно поэтому он и был использован в наших экспериментах.

Экспериментальные исследования термогравиметрического анализа осуществляются на дериватографе / 61 /. Основные преимущества дериватографа как инструмента научного исследования следующие:

— в ходе одного эксперимента снимаются кривые термогравиметрического анализа (ТГ), скорость изменения веса (ДТГ), дифференциально-термического анализа (ДТА) и температуры (Т); т.е. в результате одного опыта появляется обширная информация, пригодная для качественной и количественной обработки.

В экспериментах с использованием термогравиметрического метода существует большое число факторов, влияющих на значение результатов. Уэллман / 62 / разбивает эти факторы на две основные группы.

К первой группе относятся факторы, связанные:

- с измерительными приборами, определяющими скорость нагревания печи, скорость записи результатов, атмосферу в печи;
- с формой держателя образца;
- с чувствительностью записывающего устройства;
- с химическим составом материала контейнера для образца.

Ко второй группе - факторы, характеризующие навеску:

- масса;
- растворимость выделяющихся газов;
- размер частиц;
- теплота реакции разложения и горения;
- плотность упаковки частиц;
- состав;
- теплопроводность.

При термическом разложении лито целлюлозных материалов протекает ряд параллельных и последовательных сложных реакций, которые трудно разделить, если скорость нагревания печи высока. Поэтому при исследовании этих процессов используются относительно небольшие скорости нагрева по сравнению с существующими в топках паровых котлов. В наших экспериментах была принята скорость нагрева $0,16 \frac{K}{с}$. Снижение скорости нагрева навески вызывает уменьшение характерных температур процессов разложения. При увеличении скорости нагрева наблюдается перемещение пиков ДТА в сторону более высоких температур, а также определенный прирост площадей под пиками /62/.

Сильва /63/ описал влияние скорости нагрева на процесс выхода летучих из бачасо. В результате собственных экспериментов при скоростях $0,04$ и $0,16 \frac{K}{с}$ он получил разные кривые потери веса (ТГ), особенно в температурных зонах выше $600 K$. При ско-

рости нагрева $0,16 \frac{B}{C}$ хорошо приближаются этапы процесса термического разложения.

Большое значение имеет исключение влияния диффузионных процессов. С этой точки зрения большую роль играют форма держателя навески и размеры частиц. Как отмечает / 64 /, многотарельчатый держатель навески позволяет ликвидировать градиенты парциальных давлений в порошкообразной массе и обеспечивает лучшее разделение перекрывающихся друг друга реакций; кроме этого, многотарельчатый держатель уменьшает градиент температур в навеске.

Как отмечено в / 65 /, размеры частиц оказывают большое влияние на процесс термического разложения. Уменьшение размеров частиц вызывает уменьшение начальной и конечной температуры реакции. В работе / 63 / определены значения характерных температур, при которых скорости реакций являются самыми высокими для разных размеров частиц багассо, в результате чего сделан вывод, что для частиц с размером $\delta_T = 0,16 \times 10^{-3} - 0,2 \times 10^{-3} \text{ м}$ исключается возможность появления диффузионных отклонений. Слой материала в держателях должен быть очень тонким. Однако если плотность материала очень низкая, то вес образца оказывается небольшим и, следовательно, возрастает ошибка в определении убыли массы. В / 63 / приводятся кинетические кривые процесса выхода летучих из багассо в атмосфере азота для массы навесок 70 и 30 мг. Полученные кривые практически одинаковы, что показывает малое влияние изменения массы навесок (в интервале 30-70 мг) на процесс выхода летучих.

При исследованиях в неподвижной атмосфере возможно повышение концентрации выделяющегося газа над исследуемым веществом и изменение из-за этого скорости реакции. Поэтому для получения воспроизводимых результатов рекомендуется использовать динами-

ческую атмосферу / 62 /. Однако динамическая атмосфера может вызывать перемещение пиков ДТА в сторону более низких температур. В работах / 63, 64 / показано, что при расходах gases $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, влияние вышесказанных явлений, оказывается меньше погрешности измерений.

Теплота реакции разложения влияет на температурный градиент между частицами и окружающими газами. При эндотермических реакциях температура газа превышает температуру навески, а при экзотермических — наоборот. Как указывает Уэндландт / 62 /, при разнице температур выше 283 К может возникать значительная ошибка в расчетах кинетических параметров. Поэтому в экспериментах необходимо стремиться к уменьшению температурного градиента между частицами и окружающими газами.

Учитывая сказанное выше, были приняты следующие условия для проведения наших экспериментов с навеской натурального багассо:

- динамическая атмосфера с расходом gases $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$;
- постоянная скорость нагрева образца 0,16 К/с;
- многотарельчатый двигатель с равномерным тонким слоем багассо толщиной меньше $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- средний диаметр частиц багассо $0,16 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- эталон — прокаленный порошок оксида алюминия, Al_2O_3 .

Для определения кинетических параметров термического разложения образца по данным термогравиметрических кривых adopted допущение, что скорость реакции подчиняется следующему уравнению:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = K (1 - \alpha)^n \quad , \quad (3.27)$$

где

$$\alpha = \frac{W_0 - W}{W_0 - W_K} \quad , \quad (3.28)$$

W_0, W, W_K — начальный текущий и конечный вес навески, мг;

n — инициальный порядок реакции;

τ — время, с;

K — константа скорости реакции, подчиняется закону Аррениуса:

$$K = K_0 \exp(-E/RT), \quad (3.29)$$

где K_0 — предэкспоненциальный множитель, 1/с;

E — инициальная энергия активации, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$;

R — универсальная газовая постоянная, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$;

T — температура нагрева, К.

Это допущение было применено в [63] и показало весьма высокую погрешность при обработке результатов.

Решение уравнения (3.27) можно осуществить, используя функцию $p(x)$ метода Замо [66]. Он заключается в определении некоторого последовательных приближений тех значений инициальной энергии активации E и инициального порядка реакции n , при которых величина ошибки δ достигает минимального значения:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (B_i - \bar{B})^2}{N \bar{B}^2}}, \quad (3.30)$$

где N — число точек термобалансировочной кривой;

$\bar{B}$ — среднее значение величины B_i , рассчитываемых для каждой точки;

$$B_i = \log g(\alpha) - \log p(x). \quad (3.31)$$

Функция $g(\alpha)$ в общем случае записывается в виде:

$$g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{(1-\alpha)^n}. \quad (3.32)$$

При $n \neq 1$

$$g(\alpha) = \frac{(1-\alpha)^{1-n} - 1}{n-1}. \quad (3.33)$$

При $n=1$

$$g(\mathcal{L}) = -\ln(1-\mathcal{L}) \quad (3.34)$$

Функция $p(x)$ записывается в виде:

$$p(x) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-x}}{\chi^2} d\chi \quad (3.35)$$

Приближенное решение этого интеграла по методу Ланго:

$$p(x) \approx \frac{e^{-x}}{(x+2)(x-d)} \quad (3.36)$$

где

$$d = \frac{16}{x^2 - 4x - 84} \quad (3.37)$$

$$\chi = \frac{E}{RT} \quad (3.38)$$

Предэкспоненциальный множитель рассчитывается по формуле:

$$\log K_0 = \bar{B} + \log Rb - \log E \quad (3.39)$$

Для решения выведенных уравнений метода Ланго была использована программа на языке Бейсик, составленная /63/ для персонального компьютера NEC-88, которая позволяла получить результаты при минимизации среднеквадратичной ошибки S^2 :

$$S^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (\mathcal{L}_{\text{экс}i} - \mathcal{L}_{pi})^2 \quad (3.40)$$

где $\mathcal{L}_{\text{экс}i}$, $\mathcal{L}_{pi}$ — экспериментальное и расчетное значения $\mathcal{L}_i$;

$\mathcal{L}_{pi}$ получаем, интегрируя выражение (3.27)

При $n \neq 1$

$$\mathcal{L}_p = 1 - \left(1 + (n-1) \frac{K_0 E}{Rb} p(x)\right)^{\frac{1}{1-n}}; \quad (3.41)$$

при $n=1$

$$\mathcal{L}_p = 1 - e^{-\frac{K_0 E p(x)}{Rb}} \quad (3.42)$$

В данном случае для расчета функции $p(x)$ было использовано выражение

$$p(x) = \frac{\exp(-x)}{x} \pi(x), \quad (3.43)$$

где

$$\pi(x) = \frac{674,567 + 57,412x - 6,055x^2 - x^3}{1699,066 + 841,655x + 49,313x^2 - 8,02x^3 - x^4}$$

3.2.2. Исследование процесса термического разложения и горения натурального багаса при разных концентрациях кислорода

Опубликовано много работ о пиролизе древесины / 67,68,69, 70,71,72,73,74,75,76 /. В работах / 77,78 / приведены результаты экспериментальных исследований горения и термического разложения багаса в воздухе и в гелии методом термического анализа на дериватографе ОД-108. В / 78 / весь процесс на дериватограмме был разделен на 5 стадий. Для этих стадий были определены значения кинетических параметров, которые довольно значительно отличались от результатов по пиролизу древесины других авторов (см. табл. 3.3).

В работах / 63,79 / проведено исследование процессов горения и термического разложения багаса в воздухе и в азоте на

Таблица 3.3

Кинетические параметры различных стадий процессов
термической деструкции и горения багассо / 78 /

Атмосфера	Температурная область, К	Накопленная энергия активации, $\frac{\text{КДж}}{\text{моль}}$	Порядок реакции
Термическая деструкция в гелии	293-383	35,0	0,89
	383-443	21,0	0,1
	443-523	140,0	1,0
	523-583	64,0	0,38
	583-653	188,0	1,0
Окисление и горение в воздухе	293-383	34,0	0,84
	383-443	46,5	0,36
	443-518	214	0,9
	518-653	74,8	1,0
	653-843	33,2	0,62

Таблица 3.4

Кинетические параметры процессов термического разложения и горения багассо / 63 /

Атмосфера	Температурная область, К	Накопленная энергия активации, $\frac{\text{КДж}}{\text{моль}}$	Порядок реакции	Предполагаемый множитель, $1/\text{сек} \cdot 10^{-5}$
Термическое разложение в азоте	373-663	$75,06 \pm 3,56$	I	$0,21 \pm 0,13$
	663-979	84,3	I	0,006
Горение в воздухе	373-598	$78,84 \pm 1,98$	I	$1,499 \pm 0,74$
	598-763	$105,04 \pm 2,64$	I	$0,61 \pm 0,42$

дериватографе фирмы MOM. Полученные значения кинетических параметров (энергии активации, предэкспоненциального множителя и порядка реакции) близки к литературным данным для процесса термического разложения лигноцеллюлозных материалов (табл.3.4). Однако в литературе нет данных о процессе термического разложения и горения багассо при разных концентрациях кислорода.

С целью исследования влияния концентрации кислорода на процесс термического разложения и горения натурального багассо были проведены несколько серий опытов (всего 21 опыт) в разных атмосферах: в воздухе, в чистом азоте и в смеси кислорода (15%, 10%) и азота (85%, 90%).

Для экспериментов было использовано волокно багассо, которое предварительно сушили в печи при температуре 373 К в течение 24 часов, а затем резали на маленькие частицы и дробили до размера 0,16-0,2 мм.

Заданную концентрацию кислорода (в азоте) получали, смешивая эти газы из двух баллонов. Расходы газов измеряли расходомерами, которые предварительно были откалиброваны. Концентрацию кислорода в азоте дополнительно проверяли хроматографом "Газокром 3101".

На рис.3.8 показана одна из дериватограмм термического разложения волокна багассо в азоте, которая немного отличается от полученной в работе /63/. В ней весь процесс был разбит на три стадии:

- I - (297-373 К) - испарение физической влаги багассо;
- II - (373-663 К) разложение и выход первой группы летучих веществ;
- III - (663-473 К) разложение и выход второй группы летучих веществ и формирование структуры кокса.

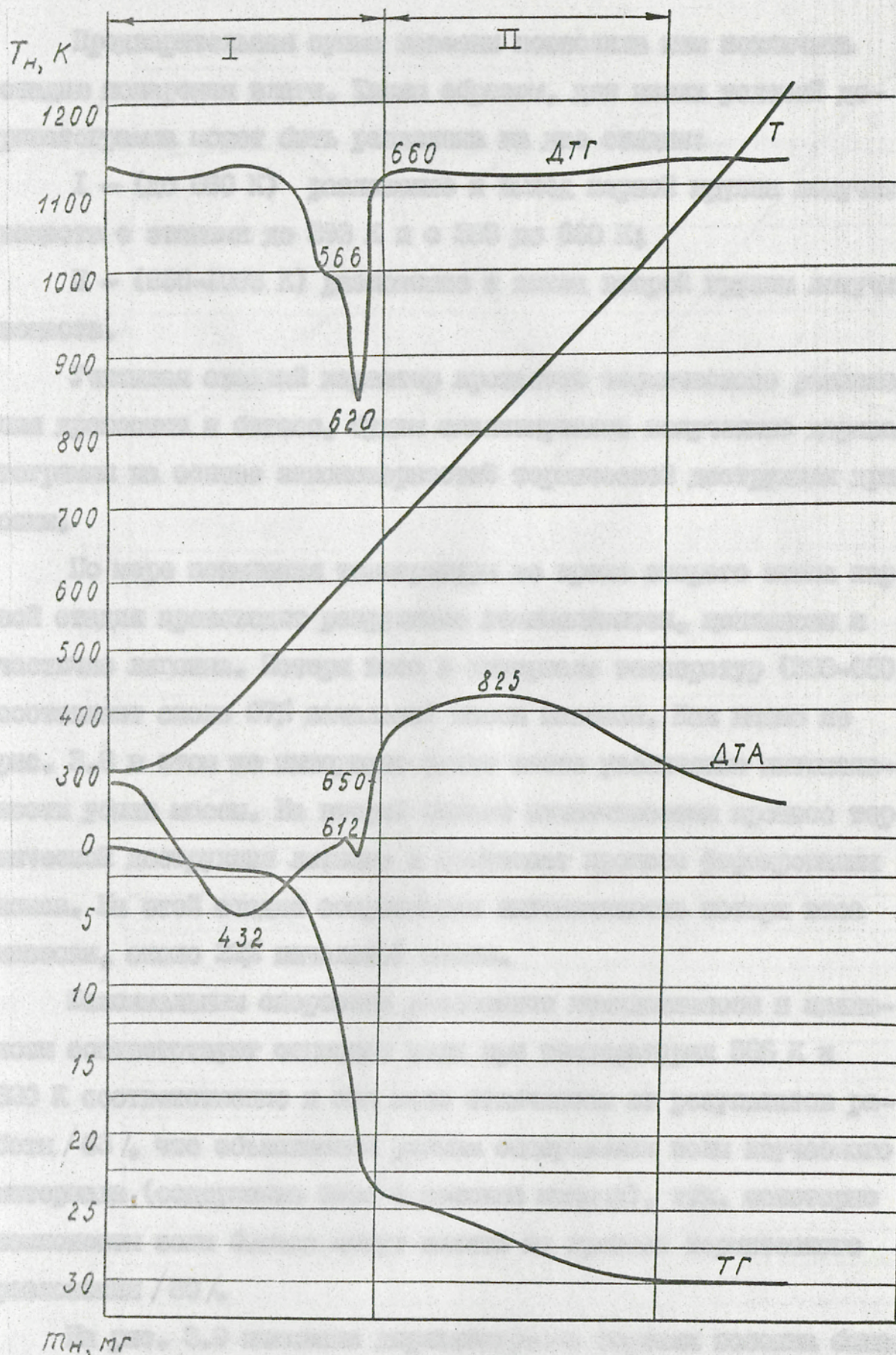


Рис.3.8. Дериватограмма термического разложения волокна багасо в азоте.

Предварительная сушка навески позволила нам исключить стадию испарения влаги. Таким образом, для наших условий дериватограмма может быть разделена на две стадии:

I — (до 393 К) разложение и выход первой группы летучих веществ с этапами до 393 К и с 393 до 660 К;

II — (660–1033 К) разложение и выход второй группы летучих веществ.

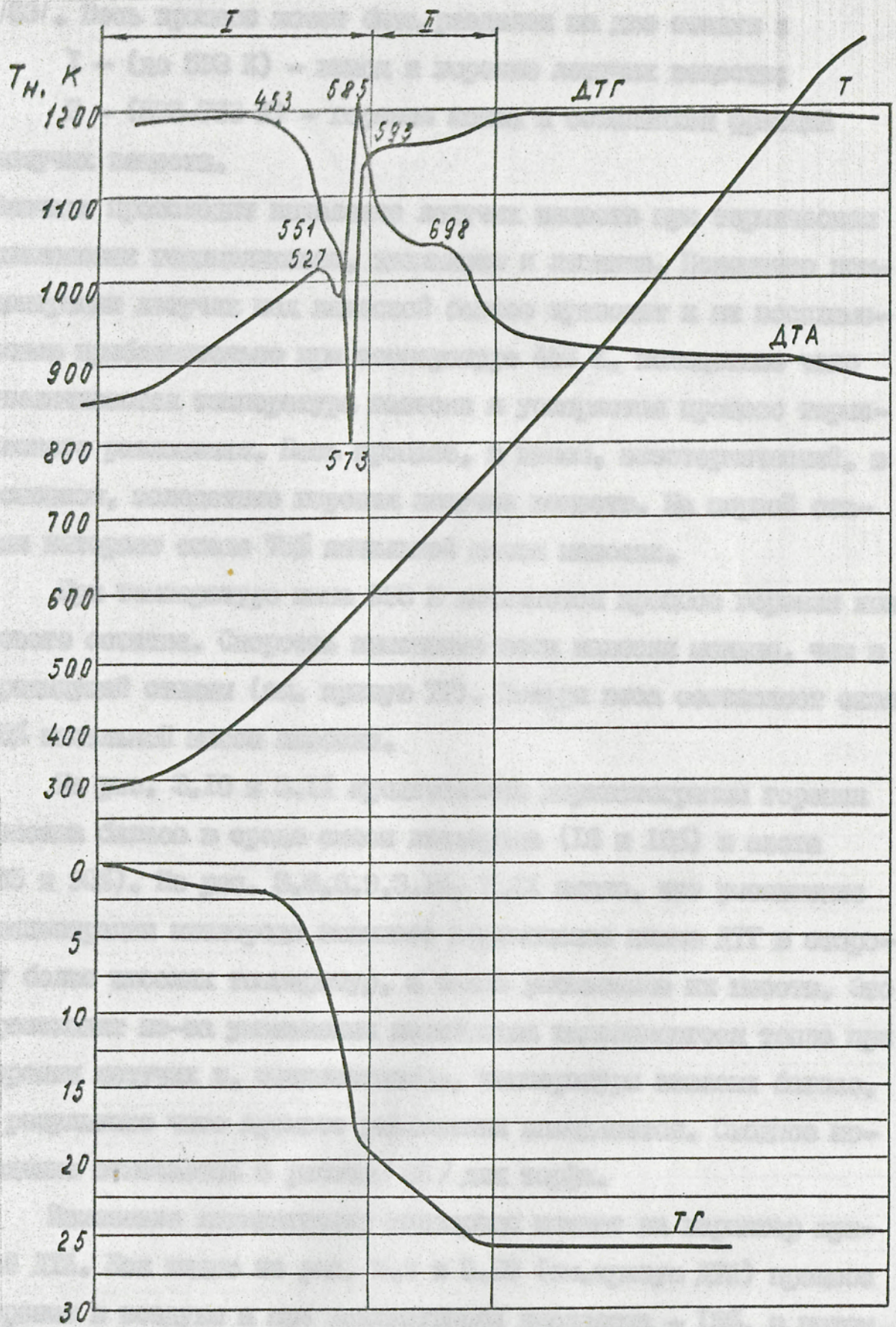
Учитывая сходный характер процессов термического разложения древесины и багассо, будем анализировать полученные дериватограммы на основе закономерностей термической деструкции древесины.

По мере повышения температуры во время второго этапа первой стадии происходит разрушение гемицеллюлозы, целлюлозы и частично лигнина. Потери веса в интервале температур (393–660 К) составляет около 67% начальной массы навески. Как видно из рис. 3.8 в этом же интервале имеет место увеличение интенсивности усадки массы. На второй стадии заканчивается процесс термической деструкции лигнина и протекает процесс формирования кокса. На этой стадии сократится интенсивность потери веса навески, около 22% начальной массы.

Максимальным скоростям разложения гемицеллюлозы и целлюлозы соответствуют основные пики при температурах 566 К и 620 К соответственно и они мало отличаются от результатов работы / 63 /, что объясняется разным содержанием золы изучаемого материала (содержание золы в волокне меньше), т.к. некоторые компоненты золы багассо могут влиять на процесс термического разложения / 80 /.

На рис. 3.9 показана дериватограмма горения волокна багассо в воздухе. Она так же мало отличается от полученной в работе

Рис. 3.9. Дериватограмма горения волокна багассо в воздухе.



m_n, mg

Рис.3.9. Дериватограмма горения волокна багасо в воздухе.

163/. Весь процесс может быть разделен на две стадии :

I — (до 593 К) — выход и горение летучих веществ;

II — (593-763 К) — горение кокса и оставшихся фракций летучих веществ.

Вначале происходит выделение летучих веществ при термическом разложении гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина. Повышение концентрации летучих над навеской багассо приводит к их воспламенению приблизительно при температуре 453 К, вследствие чего увеличивается температура навески и ускоряется процесс термического разложения. Весь процесс, в целом, экзотермический, в основном, вследствие горения летучих веществ. На первой стадии выгорает около 73% начальной массы навески.

При температуре выше 593 К начинается процесс горения коксового остатка. Скорость изменения веса навески меньше, чем в предыдущей стадии (см. кривую ТТ). Потери веса составляет около 25% начальной массы навески.

На рис. 3.10 и 3.11 представлены дериватограммы горения волокон багассо в среде смеси кислорода (15 и 10%) и азота (85 и 90%). Из рис. 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 видно, что уменьшение концентрации кислорода вызывает перемещение пиков ДТГ в сторону более высоких температур, а также уменьшение их высоты. Это происходит из-за уменьшения количества выделяющегося тепла при горении летучих и, следовательно, температуры навески багассо, в результате чего процесс разложения замедляется. Сходное поведение отмечается в работе / 81 / для торфа.

Изменение концентрации кислорода влияет на характер кривой ДТА. Как видно из рис. 3.9 и 3.10 (см. кривую ДТА) процесс горения в воздухе и при концентрации кислорода — 15%, в целом,

Рис. 3.10. Дериватограмма горения волокон багассо
в атмосфере 15% O_2 и 85% N_2 .

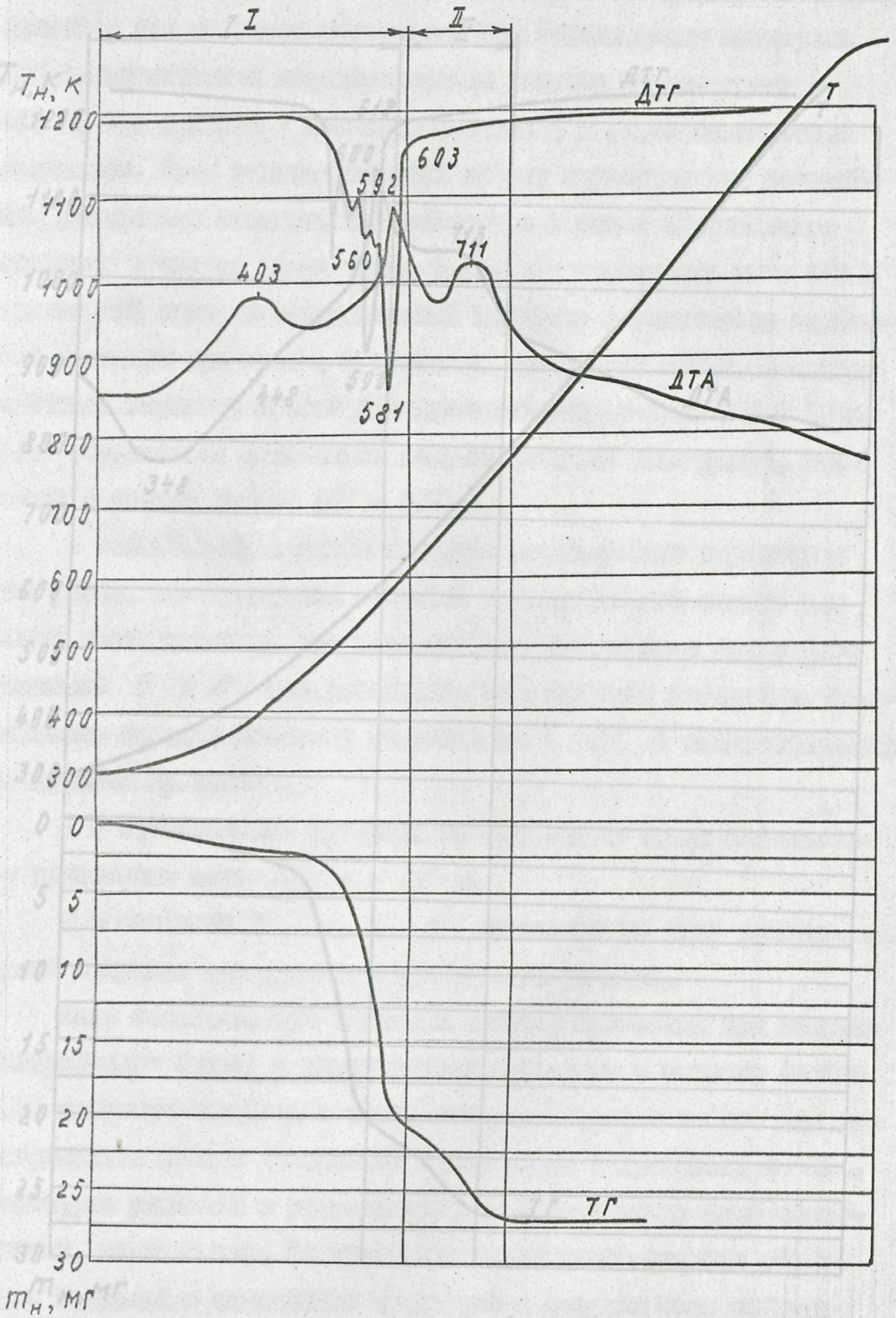


Рис.3.10. Дериwатограмма горения волокна багасо в атмосфере 15% O_2 и 85% N_2 .

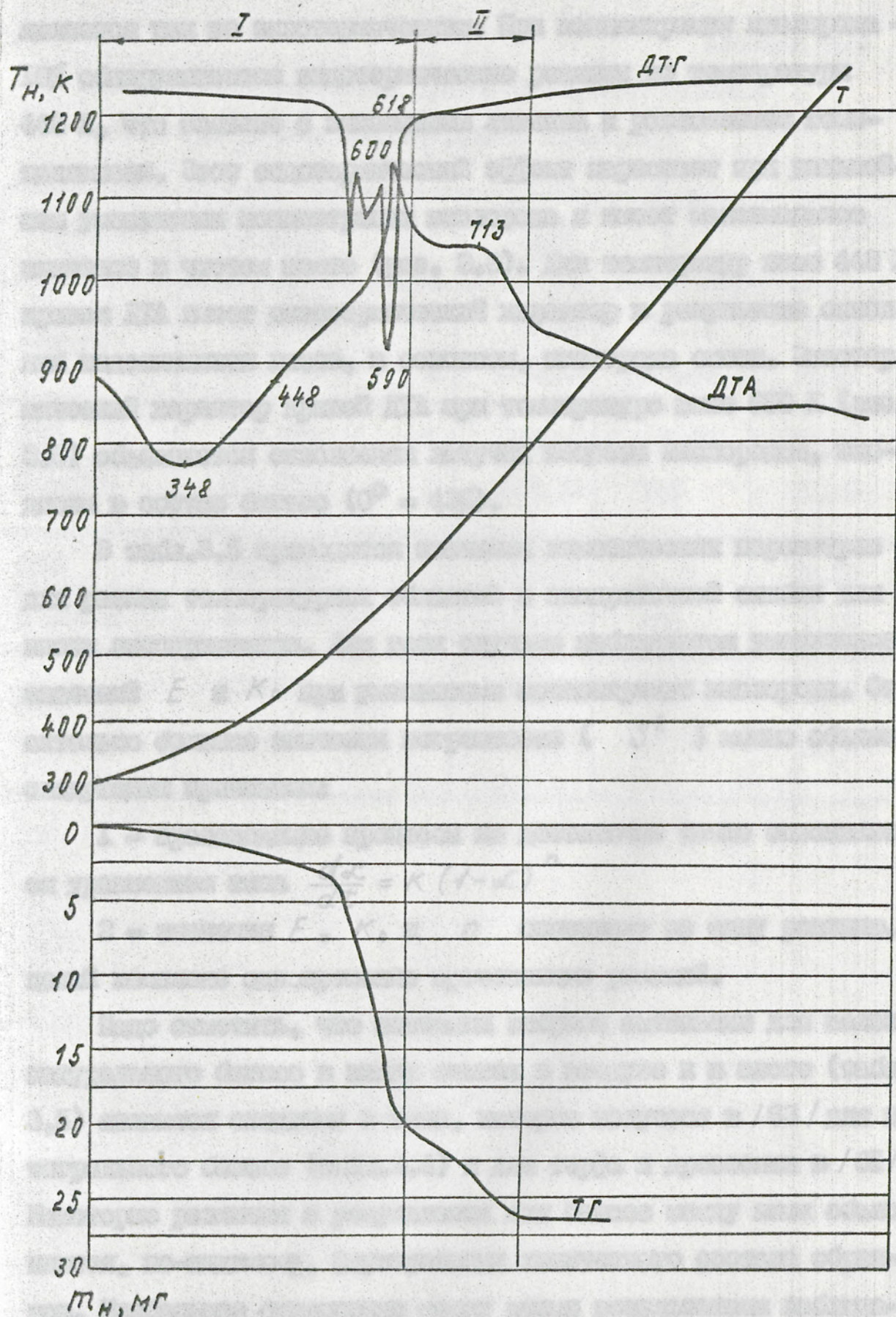


Рис.3.II. Дериватограмма горения волокна багасо в атмосфере 10% O_2 и 90% N_2 .

являются так же эндотермическими. При концентрации кислорода — 10% обнаруживаются эндотермические реакции до температуры 448 К, что связано с плавлением дитиния и разложением гемиприллиносы. Этот эндотермический эффект нарастает при дальнейшей уменьшении концентрации кислорода и имеет максимальное значение в чистом азоте (рис. 3.8). Для температур ниже 448 К кривая ДТА имеет эндотермический характер в результате окисления выходящих газов, в основном, кислорода окиси. Эндотермический характер кривой ДТА при температуре выше 650 К (рис. 3.8) объясняется окислением летучих веществ кислородом, входящим в состав бажасо ($\theta^0 = 43\%$).

В табл.3.5 приводятся значения кинетических параметров для разных температурных областей и квадратичной ошибки для наших экспериментов. Для всех случаев наблюдается уменьшение значений E и K_0 при уменьшении концентрации кислорода. Относительно большие значения погрешности (δ^2) можно объяснить следующими причинами:

1 — происходящие процессы не достаточно точно описываются уравнением типа $\frac{d\alpha}{d\tau} = K(1-\alpha)^n$

2 — значения E , K_0 и n описывают не одну реакцию, а целый комплекс одновременно протекающих реакций.

Надо отметить, что значения энергии активации для волюмина натурального бажасо в наших опытах в воздухе и в азоте (табл. 3.5) являются схожими с теми, которые получены в /63/ для интотрапального бажасо (табл.3.4) и для торфа и древесины в /81/. Некоторые различия в результатах для бажасо между нами объясняются, по-видимому, флуктуациями химического состава образцов. Наибольшее отклонение между этими результатами наблюда-

Таблица 3.5

Кинетические параметры процесса горения волокна
Сагассо при разных концентрациях кислорода

Атмосфера	Температурная область K	n	E ккал/моль	$K_0 \cdot 10^{-4}$ $\frac{1}{s}$	$S^2 \cdot 10^{+3}$
Воздух	593-593	I	79,80	17,74	0,92
	593-770	I	196,29	293,00	2,01
15% кислорода в азоте	393-603	I	73,87	6,97	2,90
	603-773	I	117,92	726	2,95
10% кислорода в азоте	393-618	I	67,67	1,31	2,21
	618-738	I	115,53	663	7,14
Азот	393-660	I	60,14	0,0477	1,47
	660-1033	I	86,86	0,0978	0,70

отоя на второй стадии процесса горения в воздухе (горение кокса), что связано с меньшим содержанием золы конусовых частиц, образованных из волокон.

Удобно анализировать влияние концентрации кислорода на скорость реакции в координатах Аррениуса $\ln K = f\left(\frac{1}{T}\right)$ (рис. 3.12 и 3.13) для торфа и бургаса соответственно. На первой стадии выхода летучих (в интервале $1,66 \times 10^{-3} - 2,5 \times 10^{-3} \frac{1}{K}$)

$\ln K$ мало изменяется при изменении концентрации кислорода. На второй стадии при горении (в интервалот $1,1 \times 10^{-3} - 1,66 \times 10^{-3} \frac{1}{K}$) $\ln K$ увеличивается при увеличении концентрации кислорода.

Полученные кинетические параметры можно использовать при расчете процесса горения самых крупных фракций бургаса, которые состоят, в основном, из волокон.

3.3. Выводы по главе

1. Теплофизические характеристики бургаса зависят от размера частиц и варьируют в пределах $C = (1,25 - 1,31) \frac{KJ}{m^2 \cdot K}$, $\alpha = (2,23 \times 10^{-7} - 2,5 \times 10^{-7}) \frac{m^2}{с}$, $\lambda = 0,05923 \times 10^{-3} - 0,06819 \times 10^{-3} \frac{KJ}{m \cdot K}$ при $T_2 = 320 - 360 K$ и $\delta_T < 1,25 \times 10^{-3} m$.

В существующих эмпирических формулах для определения теплофизических свойств бургаса не входит диаметр частиц, что является недостатком этих выражений:

2. Впервые проведены исследования по определению скорости вращения одиночной частицы натурального бургаса в диапазоне диаметров от $1,6 \times 10^{-3}$ и до $16 \times 10^{-3} m$. По экспериментальным значениям скорости вращения рассчитан коэффициент сопротивления частиц бургаса, и найдена его зависимость от размера частицы.

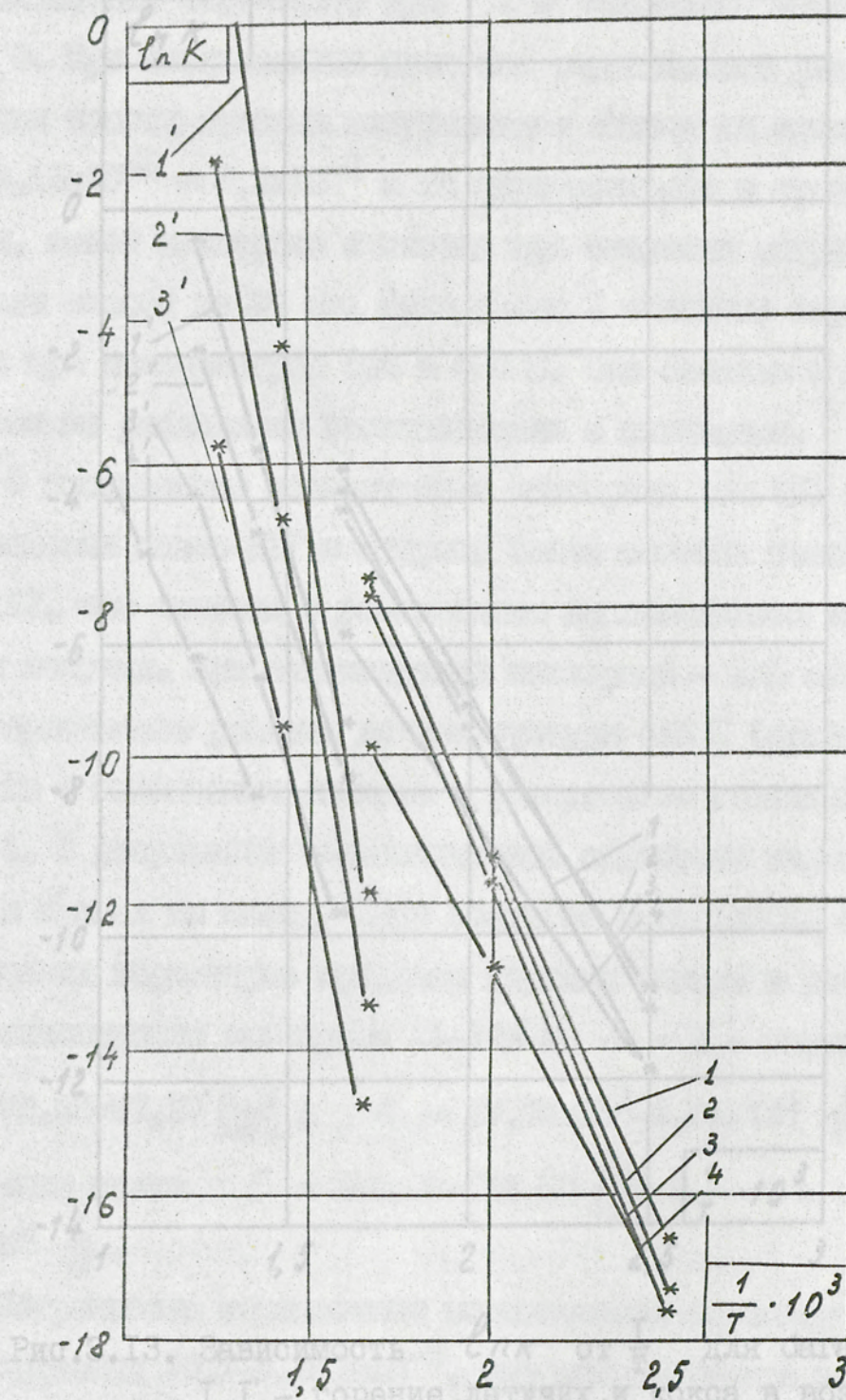


Рис.3.12. Зависимость $\ln K$ от $\frac{1}{T}$ для торфа 18I/
 1,1' - горение летучих и кокса в воздухе;
 2,2' - горение летучих и кокса в атмосфере 15% O_2
 и 85% N_2 ; 3,3' - горение летучих и кокса в
 атмосфере 10% O_2 и 90% N_2 ; 4 - выход лету-
 чих в азоте.

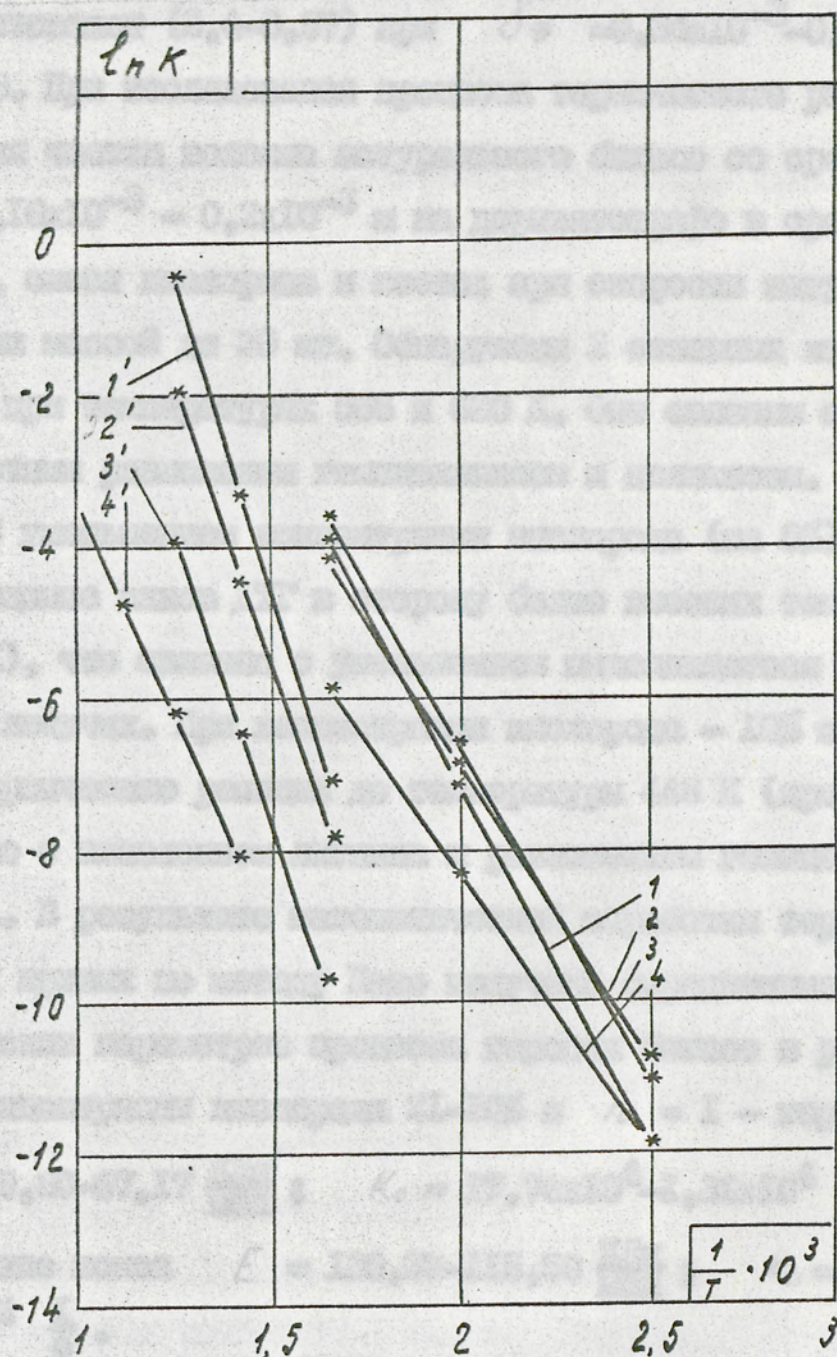


Рис.3.13. Зависимость $\ln K$ от $\frac{1}{T}$ для багасо.

1, 1' - горение летучих и кокса в воздухе;
 2, 2' - горение летучих и кокса в атмосфере
 15% O_2 и 85% N_2 ; 3, 3' - горение летучих
 и кокса в атмосфере 10% O_2 и 90% N_2 ;
 4 - выход летучих в азоте; 4' - образование
 коксового остатка в азоте.

Он составляет (2,4-0,87) при $\delta_{\Sigma}^a = 0,34 \times 10^{-3} - 0,89 \times 10^{-3}$ м.

3. При исследовании процесса термического разложения и горения частиц волокна натурального батаса со средним диаметром $0,16 \times 10^{-3} - 0,2 \times 10^{-3}$ м на дериватографе в среде воздуха, азота, смеси кислорода и азота; при скорости нагрева $0,16 \frac{K}{C}$ навески массой до 30 мг. Обнаружены 2 основных характерных пиков при температурах 566 и 620 К. Они связаны с максимальными скоростями разложения гемипеллюлозы и целлюлозы.

С уменьшением концентрации кислорода (на 5%) наблюдается перемещение пиков ДТГ в сторону более высоких температур (на 8-10 К), что связано с уменьшением выделяющегося тепла при горении летучих. При концентрации кислорода - 10% обнаруживаются эндотермические реакции до температуры 448 К (кривая ДТА), что связано с плавлением лигнина и разложением гемипеллюлозы.

4. В результате математической обработки термогравиметрических кривых по методу Ланго получены осредненные значения кинетических параметров процесса горения батаса в разных средах. При концентрации кислорода 21-10% и $n = 1$ - горение летучих

$$E = 79,80-67,17 \frac{KJ}{MOL}; \quad K_0 = 17,74 \times 10^4 - 1,31 \times 10^4 \frac{1}{C}$$

- горение кокса $E = 130,29-115,58 \frac{KJ}{MOL}; \quad K_0 = 293 \times 10^4 - 66 \times 10^4 \frac{1}{C}.$

Погрешность определения кинетических параметров находится в пределах $(0,7-7,14) \times 10^{-3}$, что можно считать удовлетворительным. Эти параметры мало отличаются от полученных другими авторами, что доказывает достоверность наших результатов.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ НАТУРАЛЬНОГО БАГАСО

4.1. Методика исследования и обработки экспериментальных данных

В настоящее время существует два направления в изучении теории горения твердого топлива /82/:

- экспериментальное изучение отдельных стадий процесса и влияния разных факторов на его развитие; на основании обобщения экспериментального материала предлагается эмпирические зависимости, имеющие ограниченное применение;
- анализ отдельных стадий горения на основе физико-химических гипотез о механизме его развития, что позволяет, на основе определенных допущений математически описать эти стадии и выявить условия перехода от одной стадии к другой.

Исследования процесса горения натурального твердого топлива, проведенные в СССР /59, 63, 64, 65, 66, 67/ и за рубежом /68, 69, 90/ и др. показывают, что этот процесс можно условно разделить на следующие стадии:

- прогрев и сушка частиц;
- выход и горение летучих веществ;
- горение коксового остатка, состоящего из углерода и золы.

В работах /63, 78/ использовано это разделение при исследовании процесса горения прессованных частиц багасо. В результате обработки опытных данных были получены эмпирические зависимости. Руне /78/ предлагает следующие выражения для расчета продолжительности процессов прогрева (τ_n) и испарения влаги

($\tau_{исп}$) прессованных частиц багасо в диапазоне начального диаметра частиц $\delta_0 = 10^{-2} - 15 \cdot 10^{-2}$ м, температуры воздушного потока $T_n = 500-800$ К и его скорости 5-15 м/с:

$$\tau_n = \frac{4,16 \times 10^5 \delta_0}{(1 + 50 \delta_0) (\alpha_n + \alpha_k)} \cdot \ln \left(\frac{T_n - T_0}{T_n - T} \right), \quad \text{с}; \quad (4.1)$$

$$\tau_{исп} = \exp [0,9 - 0,01 \delta_0 + (0,04 \delta_0 - 0,08) V + \frac{380}{T_n - 423}] \text{ с}. \quad (4.2)$$

где α_n , α_k - коэффициенты теплоотдачи излучением и конвекцией;

T_0 , T - начальная и конечная температуры прессованной частицы в процессе ее прогрева, К.

Надо отметить, что эти выражения не учитывают начальное содержание влаги прессованных частиц. Кроме того, температура воздушного потока не достигает значений температуры топочных газов котлов, сжигающих багасо (см. раздел 2.2.3).

В работе / 91 / приводятся результаты исследования процесса горения одиночной частицы древесины при следующих условиях: диаметр частиц $\delta = 5 \times 10^{-3} - 25 \times 10^{-3}$ м, температура потока $T_n = 900-1200$ К, влажность частицы $W^{абс} = 0-200\%$.

Весь процесс горения был разделен на две стадии: до полного сгорания летучих и горения консового остатка. Экспериментальные данные показывают, что при увеличении абсолютного значения начального влагосодержания частицы от 0 до 200% продолжительность первой стадии увеличивается от 30 до 120 с из-за увеличения времени сушки.

В результате исследований процесса горения прессованных частиц багасо Сильва / 63 / получил эмпирические зависимости

для расчета продолжительности отдельных стадий при следующих условиях: диаметр частицы $\delta = 12,2 \times 10^{-3} - 18,5 \times 10^{-3}$ м, температура потока $T_n = 973 - 1273$ К, скорость потока $V = 1 - 5$ м/с, концентрация кислорода $CO_2 = 10 - 21\%$, плотность частицы $\rho = 900 - 1300$ кг/м³. Он предлагает следующие выражения для расчета продолжительности отдельных стадий:

- стадия пламенного горения летучих

$$\Delta \tau_{пл} = 0,5213 \times 10^5 \delta^{1,798} \rho^{0,64} (T_n - 273)^{-0,481} CO_2^{-0,206}, \text{ с}; \quad (4.3)$$

- стадия горения коксового остатка

$$\Delta \tau_{к} = 0,411 \times 10^6 \delta^{1,52} \rho^{1,53} V^{-0,31} (T_n - 273)^{-0,989} CO_2^{-1,92}, \text{ с}. \quad (4.4)$$

Как видно из выражения (4.3), на продолжительность стадии пламенного горения летучих ($\Delta \tau_{пл}$) наибольшее влияние оказывают диаметр и плотность частицы. В работе /91/ также отмечается влияние величины начального размера частицы древесины на продолжительность стадии пламенного горения летучих. При увеличении диаметра частицы от 10^{-2} до $2,5 \times 10^{-2}$ м время пламенного горения увеличивается от 38 до 220 с, что близко к результатам автора /63/.

В результате дополнительной серии опытов с целью изучения влияния влажности прессованных частиц багасо на продолжительность различных стадий Сильва /63/ сделал вывод, что стадия пламенного горения летучих практически не зависит от содержания влаги частицы. Начальная влажность в опытах менялась в пределах 3,8-23,5%.

Как показывает выражение (4.4), определяющими факторами

на продолжительность стадии горения коксового остатка является концентрация кислорода в потоке, диаметр и плотность частицы. В работе /91/ также отмечается определяющее влияние диаметра частицы древесины на продолжительность стадии горения кокса, которая увеличивается от 43 до 180 с при увеличении диаметра частицы от 10^{-2} до $2,5 \times 10^{-2}$ м. С другой стороны авторы указывают на сильное влияние концентрации кислорода на продолжительность стадии горения кокса, а также независимость этой стадии от начального содержания влаги частицы древесины.

Таким образом, в наших исследованиях процесса горения частиц натурального бажасо целесообразно изучать отдельные стадии процесса, влияние разных факторов на их развитие и попытаться получить эмпирические зависимости, позволяющие рассчитать эти стадии. С этой целью были проведены опыты на экспериментальной установке, смонтированной на кафедре РИПС Ленинградского политехнического института.

4.2. Экспериментальная установка для исследования процесса горения частиц натурального бажасо

Для исследования процессов выхода и горения летучих, а так же горения коксового остатка частиц натурального бажасо во взвешенном состоянии была использована экспериментальная установка ЛПИ, описанная в /92/. Она позволяет исследовать процесс горения одиночных частиц твердого топлива в широком диапазоне изменения температуры (до 1473 К), скорости (до 10 м/с) и состава газового потока (рис.4.1).

Рабочая среда (воздух или другой газ) подается во внешний конус печи, затем во внутренние и, оттуда, - в реакционную

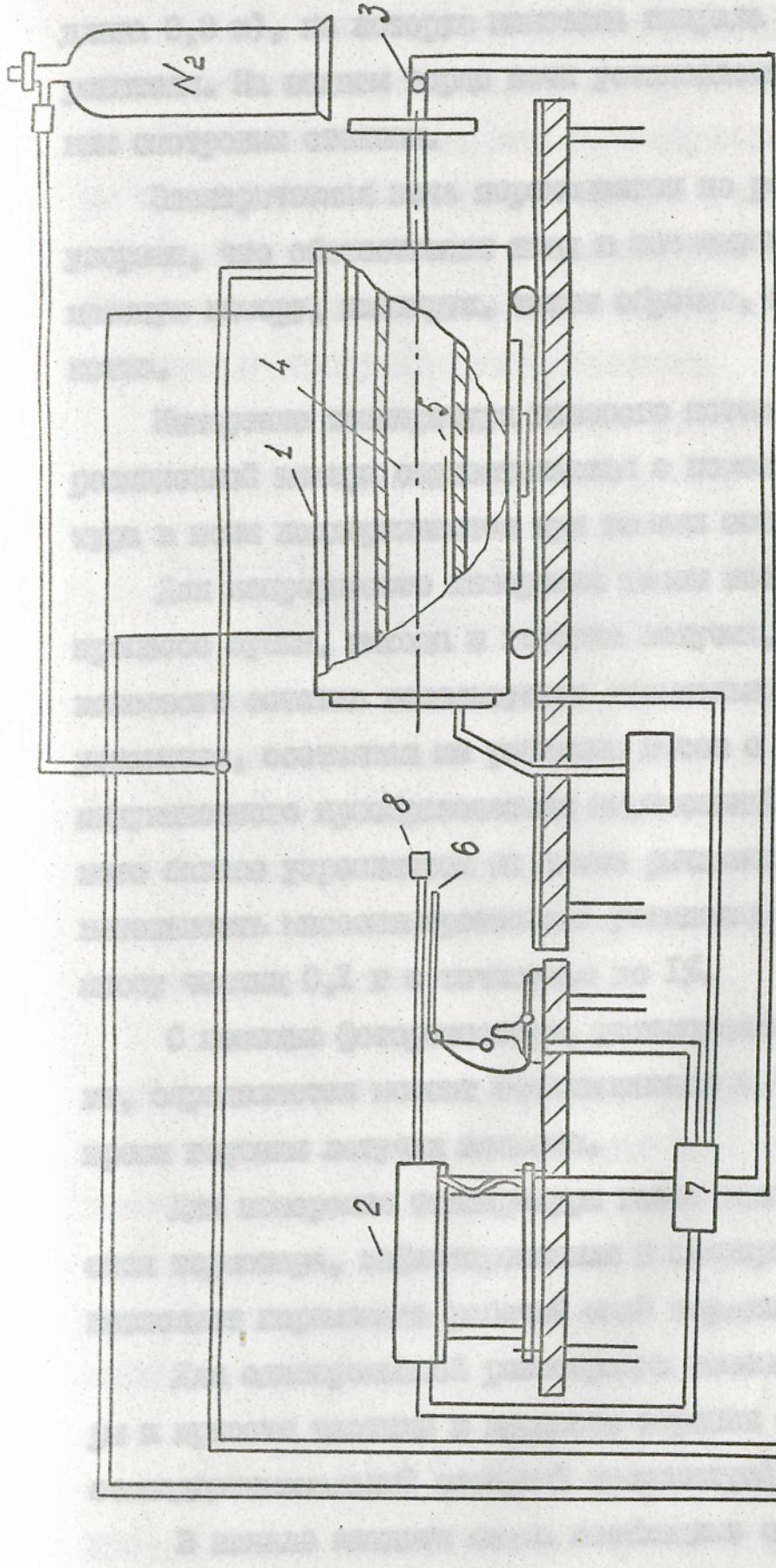


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки для изучения процесса горения частиц твердого топлива.

- 1 - электропечь; 2 - массоизмерительная установка; 3 - фотодиод;
4 - реакционная камера; 5, 6 - термопары; 7 - шлейфный осциллограф;
8 - частица топлива.

камеру, состоящую из алюминиевой трубки ($\frac{d_{вн}}{d_{н}} = \frac{54}{64} \times 10^{-3}$ м, длина 0,3 м), на которую намотана спираль электрического нагревателя. На заднем торце печи установлена гильза с жаропрочным смотровым стеклом.

Электрическая печь перемещается по рельсам между двумя упорами, что обеспечивает ввод в исследуемой частицы в реакционную камеру, илтируя, таким образом, ввод частицы в точку котла.

Измерение температуры газового потока и внутренней стенки реакционной камеры осуществляется с помощью термопар. Температура в печи поддерживается при помощи автотрансформатора.

Для непрерывного измерения массы исследуемого образца в процессе сушки, выхода и горения летучих, а также горения коксового остатка используется специальная массоизмерительная установка, состоящая из рычажных весов с масляным демпфером и индукционного преобразователя перемещений. Частица натурального багаса укрепляется на плече рычажного устройства. Чувствительность массоизмерительной установки позволяет измерить массу частицы 0,1 г с точностью до 1%.

С помощью фоторезистора, установленного со стороны гильзы, определяется момент воспламенения и потухания летучих, время горения летучих веществ.

Для измерения температуры газов около частицы располагается термопара, зафиксированная в препаратодателе, который позволяет перемещать рабочий ствол термопары с точностью 10^{-6} м.

Для одновременной регистрации изменений массы, температуры и яркости частицы в процессе горения был использован восемнадцатиканальный плембный осциллограф К-117.

В начале каждого опыта необходимо оттарировать массоизмерительную установку. Затем частица натурального багаса закреп-

ляются на плече рычажного устройства (пружинным фарфоровая трубка). Печь переключается по рельсам и при изводе исследуемой частицы в реакционную камеру выключается съема и начинается запись исследуемых параметров на фотобумаге инфракрасного осциллографа (температуры потока и газа около частицы, убыль относительной массы частицы, показание фотодиагн.). Когда все частицы стабилизируются (окончание горения) печь отключается и эксперимент заканчивается.

Погрешность измерений массы исследуемого образца в наших опытах можно оценить в пределах $\pm 10\%$.

4.3. Экспериментальное исследование процесса горения частицы натурального багаса на стояне

Проведенные исследования горения частиц древесины, прессованных частиц багаса и других твердых топлив / 90, 91, 93, 94, 95 / показывают заметное влияние на продолжительность отдельных стадий процесса горения: диаметра, формы и плотность частиц, содержания влаги, а также температуры, концентрации кислорода и скорости газового потока.

При выборе пределов изменения параметров для наших опытов учитывали характеристики крупных фракций багаса, которые могут образовывать механический налет и условия их выгорания в точном объеме во взвешенном состоянии (табл. 4.1). В качестве характерного размера частиц был принят диаметр эквивалентного цилиндра $\delta F/V$, который определяется следующим выражением:

$$\delta F/V = \frac{2B \cdot C}{B+C} \quad , \quad M \quad , \quad (4.5)$$

где B , C — линейные размеры частицы, м.

Таблица 4.1

Пределы изменения учитываемых параметров при
планировании экспериментов

№ Переменный параметр		Уровни изменения параметров		
		- I	0	I
1 диаметр частицы ($\delta_{F/V}$)	м	0,003	0,005	0,007
2 влажность частицы	%	15	30	50
3 скорость среды	м/с	1	2	3
4 концентрация кислорода	%	10	15	21
5 температура потока	К	973	1123	1273
6 плотность сухой частицы	$\frac{кг}{м^3}$	350	250	150

В качестве матрицы планирования был выбран композиционный трехуровневый план, который учитывает 6 независимых переменных. Это позволило свести количество необходимых опытов до 29. Максимальный модуль коэффициента корреляции оценок параметров для этого плана составит 0,94 / 96 /.

При исследовании горения частиц натурального багасо нами было проведено более 100 опытов, т.к. каждый опыт повторялся 3 или 4 раза с целью получения более точных результатов.

Для экспериментов были отобраны фракции багасо со средним диаметром больше 2×10^{-3} м. Для всех частиц при помощи микроскопа были определены три линейных размера A , B и C в трех сечениях частиц и их вес на весах с чувствительностью 0,001 г. Затем была рассчитана плотность каждой частицы. Химический состав багасо, используемого для опытов, был определен в Центральной Химической Лаборатории ИЮ ЦКТИ. Средние

значения результатов трех анализов приводятся в табл. 4.2.

В качестве примера на рис. 4.2 приведена термограмма частицы натурального багассо $\delta F/v = 5 \cdot 10^{-3}$ м при $T=1123$ К $CO_2 = 15\%$, $V = 2$ м/с. Характеристики этой частицы даны в приложении 4. В термограмме характерные кривые имеют следующие обозначения:

m/m_0 — убыль относительной массы частицы;

T_r — температура газа около частицы (в начале опыта термометра находится на расстоянии 10^{-3} м от поверхности частицы), К;

$\phi.g.$ — показание фотодиода;

T_n — температура газового потока в печи, К.

Термограмма процесса горения частицы натурального багассо может быть разделена на три стадии:

$\tau_{вл}$ — стадия прогрева, сушки и выхода летучих веществ до воспламенения;

$\Delta \tau_{гл}$ — стадия пламенного горения летучих;

$\Delta \tau_{гк}$ — стадия горения коксового остатка.

При внесении частиц натурального багассо в камеру сгорания начинается процесс прогрева, который осуществляется за счет лучистого и конвективного теплообмена. Прогрев частицы сопровождается сушкой и выходом летучих, которые с кислородом потока образуют горючую смесь.

Горение летучих веществ характеризуется быстрым уменьшением массы частицы и резким увеличением температуры газа около нее (до 1400 К). Горение летучих происходит вокруг частицы в виде пламени (наблюдается неравномерная оболочка горящих летучих около частицы). Поверхность горения летучих затрудняет диффузию кислорода к поверхности частицы и, следовательно,

Таблица 4.2

Результат анализа балласта, использованного для опытов

Обозначение	Размерность	Величина
Q_H^P	$\frac{мг}{кг}$	17,3
W^P	%	3,8
A^P	%	1,38
S^P	%	0,14
C^P	%	48,4
H^P	%	5,18
$O^P + N^P$	%	41,1
Q_B^C	$\frac{мг}{кг}$	19,2
A^C	%	1,43
S^C	%	0,15
Q_B^r	$\frac{мг}{кг}$	19,5
C^r	%	51,04
H^r	%	5,46
S^r	%	0,15
V^r	%	84,72

Рис. 4.2. Технологический процесс получения балласта.

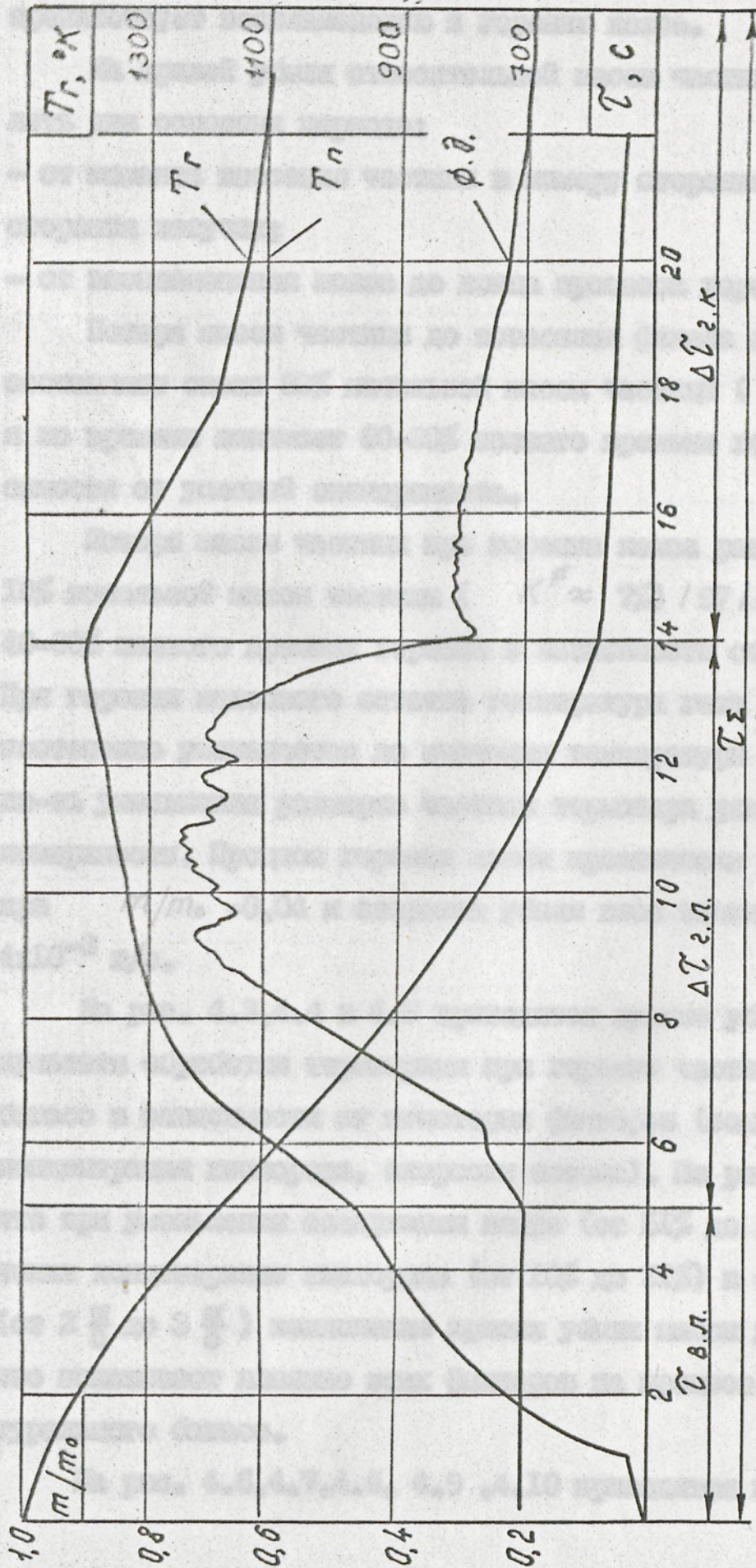


Рис.4.2. Термограмма процесса горения частиц натурального газа.

препятствует воспламенению и горению кокса.

На кривой убыли относительной массы частицы можно выделить два основных периода:

- от момента внесения частицы в камеру сгорания до полного сгорания летучих;
- от воспламенения кокса до конца процесса горения.

Потеря массы частицы до погасания факела летучих веществ составляет около 90% начальной массы частицы ($V^p + W^p \approx 90\%$) и по времени занимает 60-80% полного времени горения в зависимости от условий эксперимента.

Потеря массы частицы при горении кокса равна примерно 10% начальной массы частицы ($K^p \approx 7\%$) / 97 / и около 40-60% полного времени горения в зависимости от условий опыта. При горении коксового остатка температура газа около частицы постепенно уменьшается до значения температуры потока, т.е. из-за уменьшения размеров частицы термопара удаляется от ее поверхности. Процесс горения кокса практически заканчивается при $m/m_0 = 0,04$ и скорости убыли веса частицы, равной 4×10^{-3} г/с.

На рис. 4.3, 4.4 и 4.5 приводятся кривые убыли массы результаты обработки термограмм при горении частиц натурального багасо в зависимости от некоторых факторов (содержания влаги, концентрации кислорода, скорости потока). На рисунках видно, что при уменьшении содержания влаги (от 51% до 15%) и увеличении концентрации кислорода (от 10% до 21%) и скорости потока (от $2 \frac{M}{C}$ до $3 \frac{M}{C}$) наклонение кривых убыли массы увеличивается, что показывает влияние этих факторов на процесс горения натурального багасо.

На рис. 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 приводятся кривые зависи-

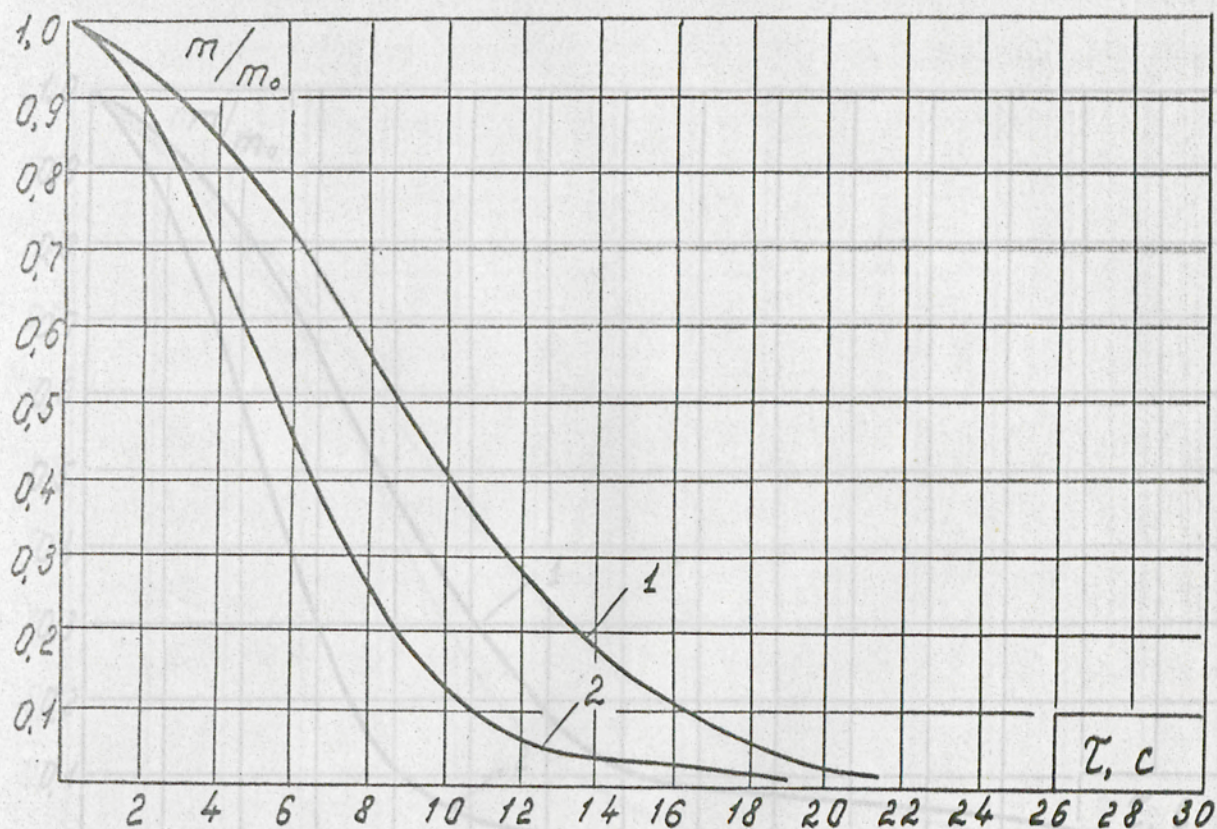


Рис.4.3. Кривые убыли массы при горении частиц натурального багасо с разным содержанием влаги

($T_n = 1073$ К, $V = 1 \frac{M}{C}$, $Co_2 = 21\%$, $\rho = 286 \frac{KГ}{M^3}$)

1 - $W = 51\%$; 2 - $W = 15\%$.

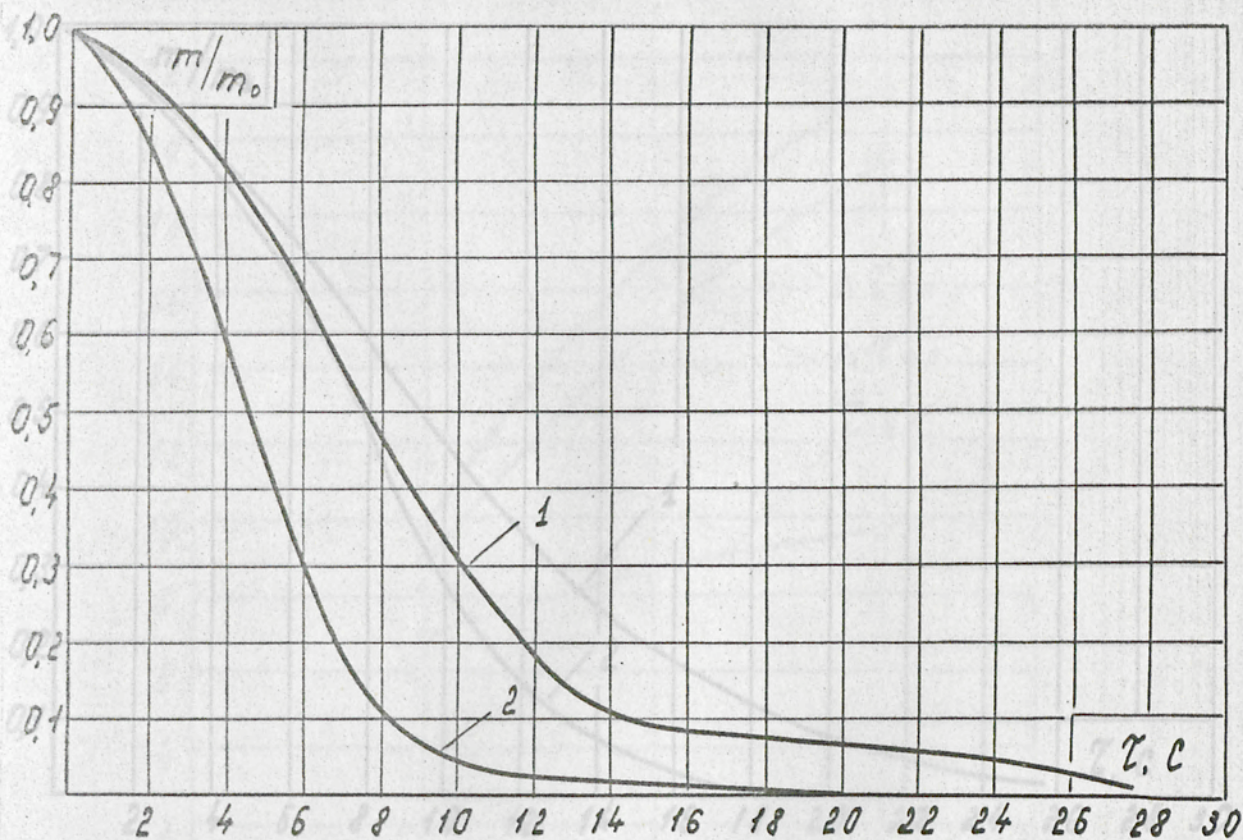


Рис.4.4. Кривые убыли массы при горении частиц натурального багаса в потоке с разной концентрацией кислорода ($T_n = 1073$ К, $V = 1 \frac{м}{с}$,

$W = 50\%$, $\rho = 265 \frac{кг}{м^3}$)

1 - $CO_2 = 10\%$

2 - $CO_2 = 21\%$.

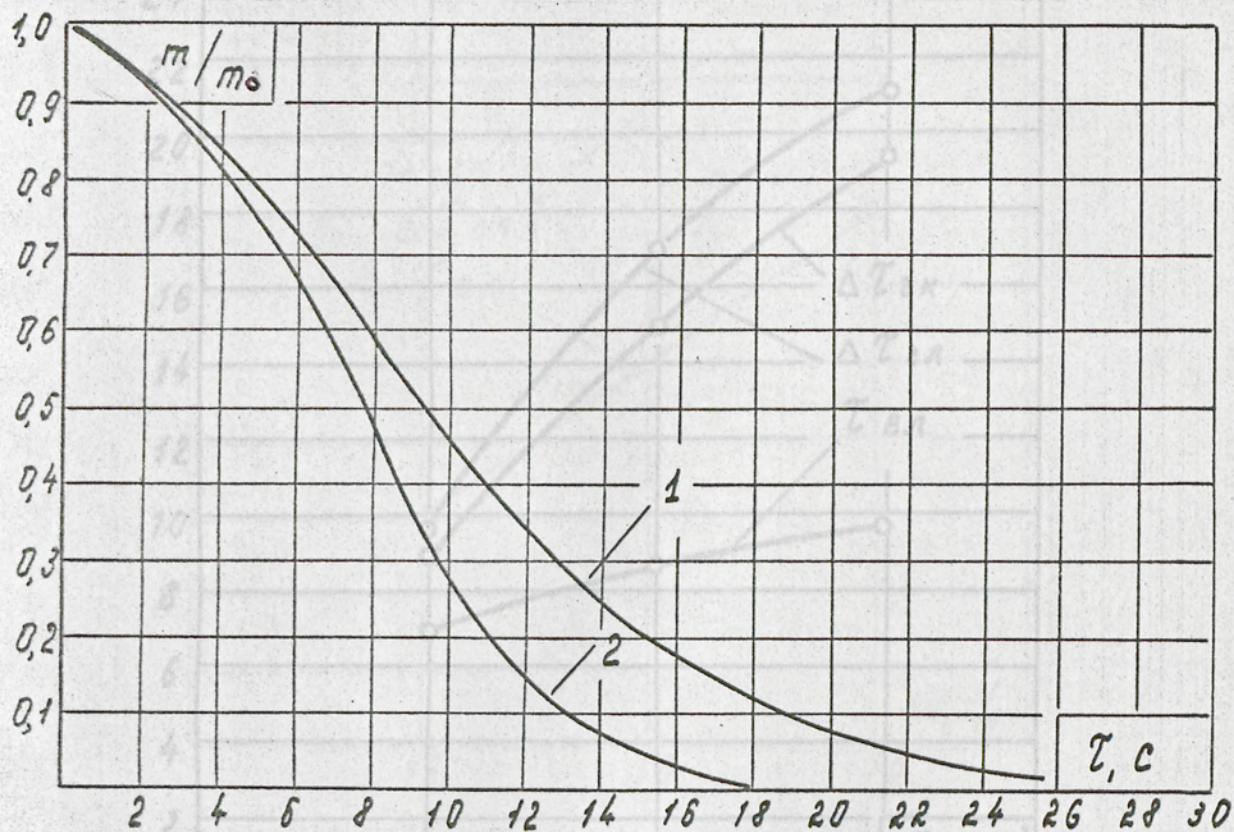


Рис.4.5. Кривые убыли массы при горении частиц натурального багаса в потоке с разной скоростью
 ($T_n = 1073$ К, $W = 50\%$, $CO_2 = 21\%$, $\rho = 292 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$)

I - $V = 2$ м/с 2 - $V = 3$ м/с.

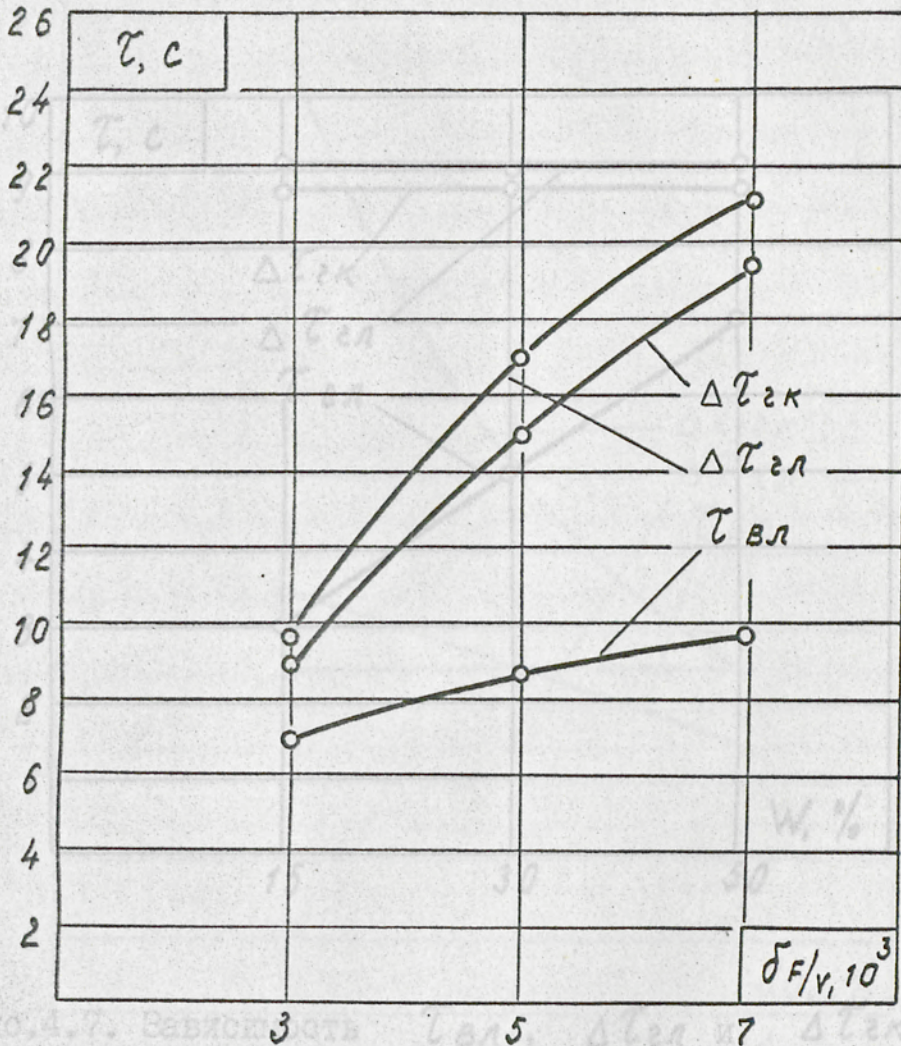


Рис.4.6. Зависимость $\tau_{вл}$, $\Delta \tau_{гл}$, $\Delta \tau_{гк}$ от диаметра частицы натурального багасо при $T_n = 973$ К, $CO_2 = 21\%$, $W = 50\%$, $V = 1 \frac{M}{C}$.

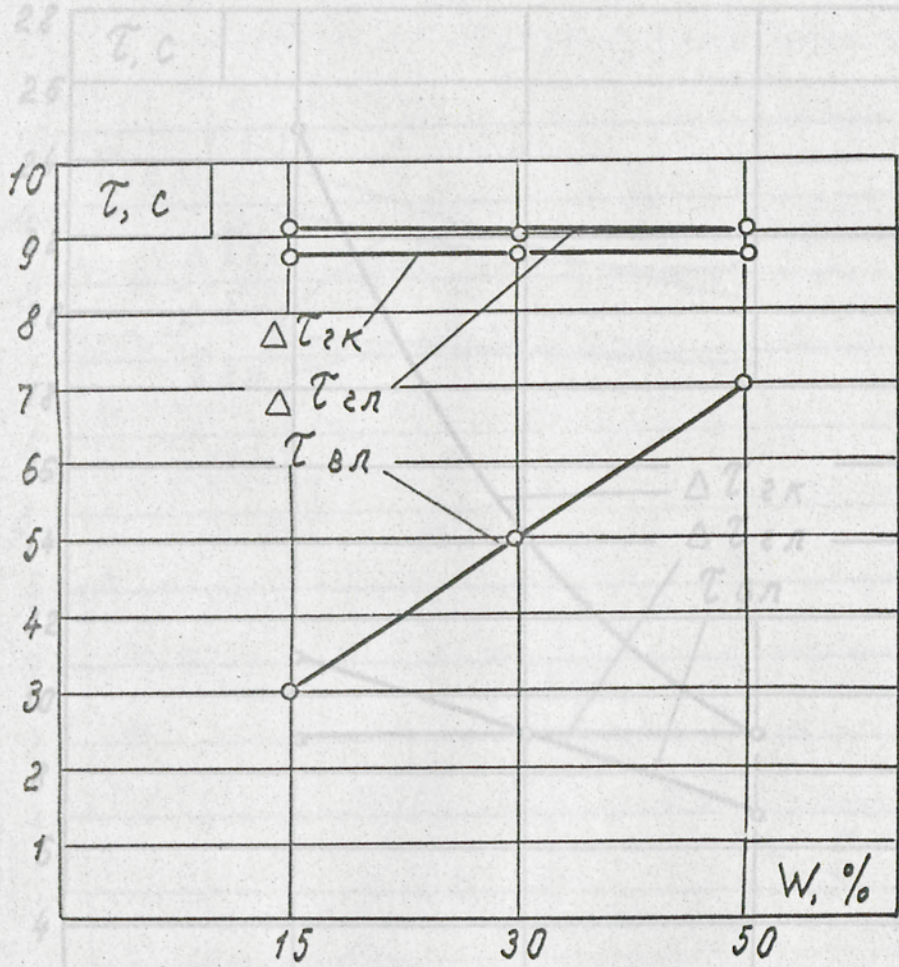


Рис.4.7. Зависимость $\tau_{вл}$, $\Delta\tau_{гд}$ и $\Delta\tau_{гк}$ от содержания влаги при $\delta F/v = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho = 600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $T_n = 973$ К, $V = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Рис.4.8. Зависимость $\tau_{вл}$, $\Delta\tau_{гд}$ и $\Delta\tau_{гк}$ от концентрации хлорода при $\delta F/v = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho = 600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $T_n = 973$ К, $W = 50\%$, $V = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

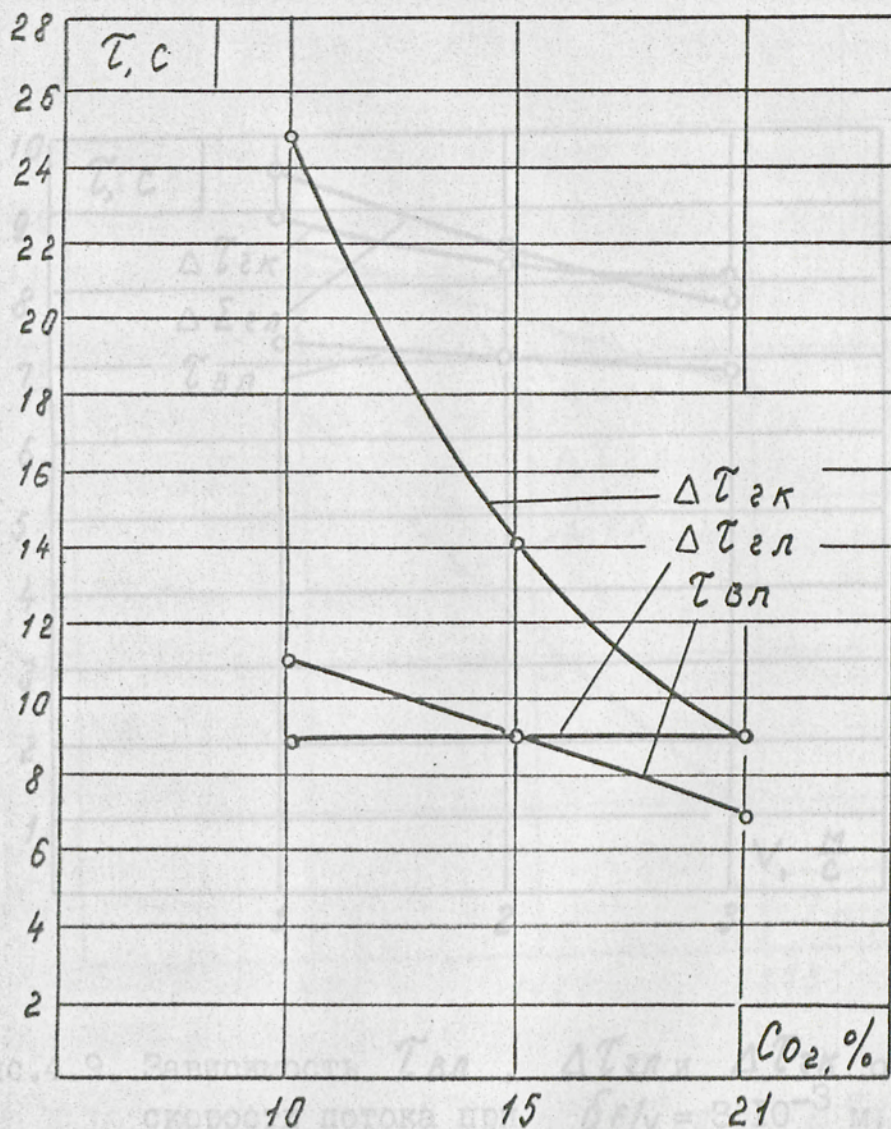


Рис.4.8. Зависимость $T_{вл}$, $\Delta T_{гл}$ и $\Delta T_{гк}$ от концентрации кислорода при $\delta F/V = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$,
 $\rho = 600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $T_n = 973 \text{ К}$, $W = 50\%$, $V = I \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

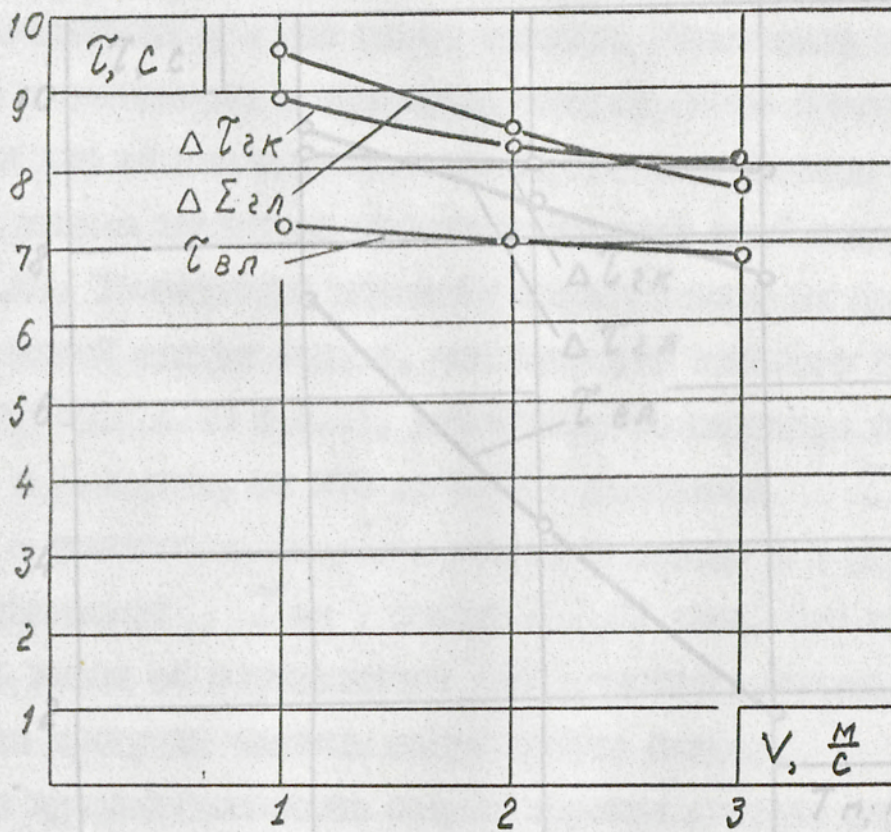


Рис.4.9. Зависимость $\tau_{вл}$, $\Delta\tau_{гн}$ и $\Delta\tau_{гк}$ от скорости потока при $\delta F/V = 3 \cdot 10^{-3}$ м,

$$\rho = 600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, T_n = 973 \text{ К}, W = 50\%,$$

$$CO_2 = 21\%.$$

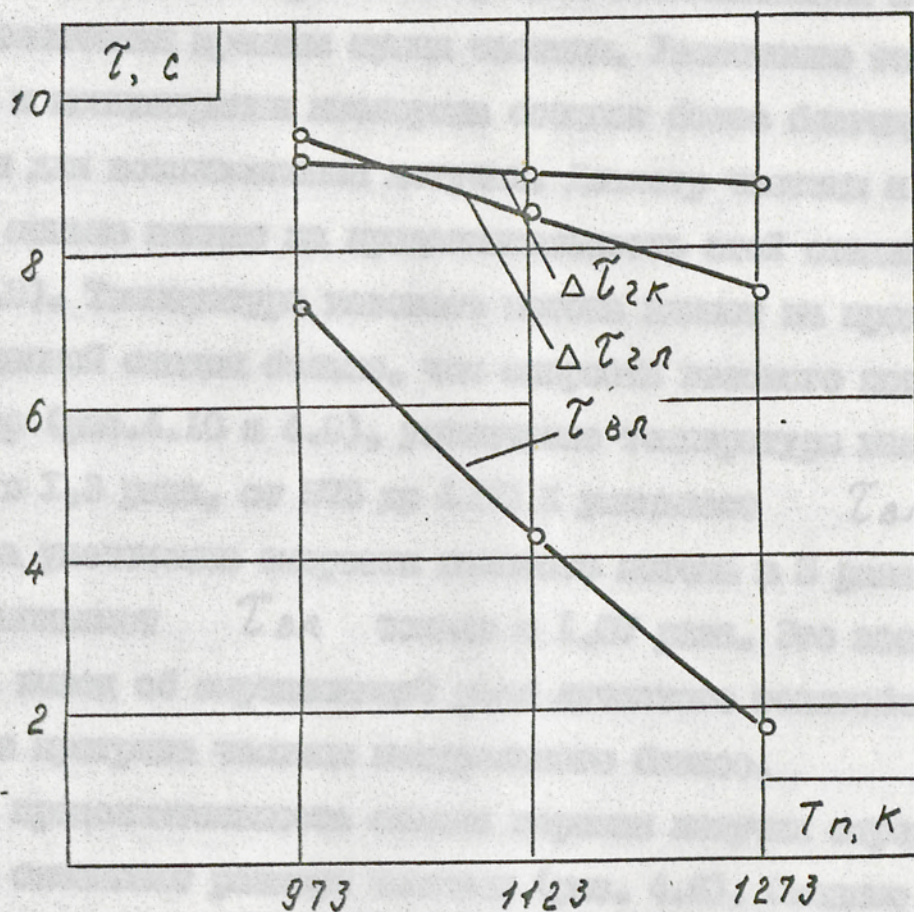


Рис.4.10. Зависимость $\tau_{вл}$, $\Delta\tau_{зл}$ и $\Delta\tau_{зк}$ от температуры газового потока при

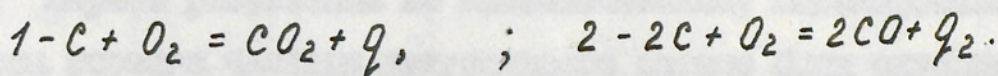
$$\delta F/V = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \rho = 600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad CO_2 = 21\%, \\ W = 50\%, \quad V = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

мости $\tau_{вл}$, $\Delta\tau_{гп}$ и $\Delta\tau_{гк}$ от диаметра и вязкости частицы и от концентрации кислорода, скорости и температуры потока. Из рисунков видно, что на продолжительность стадии до воспламенения $\tau_{вл}$ наиболее влияние оказывают содержание влаги, температура газового потока (рис. 4.7 и 4.10). Содержание влаги задерживает процесс воспламенения в результате увеличения времени сушки частицы. Увеличение температуры потока и концентрации кислорода создают более благоприятные условия для воспламенения летучих. Диаметр частицы и скорость потока меньше влияют на продолжительность этой стадии (рис. 4.6, 4.9). Температура газового потока влияет на продолжительность данной стадии больше, чем скорость газового потока. Например (рис. 4.10 и 4.9), увеличение температуры газового потока в 1,3 раза, от 973 до 1273 К уменьшает $\tau_{вл}$ в 4,35, а увеличение скорости газового потока в 3 раза от 1 до 3 м/с уменьшает $\tau_{вл}$ только в 1,07 раза. Это позволяет сделать вывод об определенной роли лучистого теплообмена в процессе прогрева частицы натурального сырья.

На продолжительность стадии горения летучих определенное влияние оказывают размеры частицы (рис. 4.6). Согласно результатам отмечены и другие исследователи для просеянных частиц сырья /63/, для частиц древесины /91/ и для частиц угля /98/. Увеличение температуры газового потока от 973 до 1273 К уменьшает длительности этой стадии ($\Delta\tau_{гп}$) в 1,26 раза и $\tau_{вл}$ - в 4,35 раза (рис. 4.10), т.е. температура газового потока влияет меньше на $\Delta\tau_{гп}$, чем на $\tau_{вл}$. Это объясняется, по-видимому, тем что приток тепла в период горения летучих и частица происходит в основном, от факела горящих летучих. Скорость газового потока намного больше влияет на

продолжительность данной стадии, чем на стадии до воспламенения (увеличение скорости потока в 3 раза от 1 до 3 м/с, уменьшает $\Delta T_{гп}$ в 1,23 раз и $T_{вл}$ в 1,07 раз) (рис. 4.9). Концентрация кислорода в потоке и содержание влаги в исходном багасе практически не влияют на $\Delta T_{гп}$ (рис. 4.8, 4.7). Независимость этой стадии от содержания влаги частицы багаса указывает, что процесс сушки частицы заканчивается до воспламенения летучих. С другой стороны поверхность горения летучих затрудняет диффузию кислорода к поверхности частицы и является причиной независимости $\Delta T_{гп}$ от концентрации кислорода. Сходные результаты получены Сильва /63/ для прессованных частиц багаса.

Как видно из рисунков 4.6 и 4.8 диаметр частицы и концентрация кислорода влияют больше других факторов на продолжительность стадии горения конуса. Аналогичные результаты получили другие авторы при горении конусовых частиц древесины /91/, прессованных частиц багаса /63/. Температура потока оказывает в этот период меньшее влияние, чем при горении летучих (увеличение температуры газового потока от 973 до 1273 К уменьшает $\Delta T_{гк}$ и $\Delta T_{гп}$ в 1,045 и 1,26 раз соответственно) (рис. 4.10). По-видимому определяющей является температура поверхности конусовой частицы, которая может принимать температуру потока на 150-300 К /63/. Сильная зависимость $\Delta T_{гк}$ от концентрации кислорода указывает на то, что кислород достигает поверхности частицы и на поверхности горящей конусовой частицы протекают окислительные реакции:



Результаты экспериментов обработаны на персональном компьютере LTEL-24. Для расчета была использована стандартная программа статического анализа „MICROSTAT“. В результате обработки опытных данных получены эмпирические выражения для расчета продолжительности отдельных стадий процесса горения частиц натурального багаса. Они имеют вид:

$$\tau = K \delta^{\beta_1} \rho^{\beta_2} C_{O_2}^{\beta_3} (1+W)^{\beta_4} (1+V)^{\beta_5} e^{\frac{\beta_6}{T_n}}, \text{ с}; \quad (4.6)$$

где $K, \beta_1 - \beta_6$ — опытные коэффициенты, приведенные в табл. 4.3.

Были получены опытные коэффициенты для диаметра эквивалентного шара δ_3^a и для диаметра эквивалентного цилиндра $\delta_{F/V}$ рассчитанные по выражениям 3.36 и 4.5 соответственно. Полученные эмпирические формулы можно использовать при расчете времени полного сгорания (τ_Σ) частицы натурального багаса в топочных условиях (во взвешенном состоянии). Кроме того, они могут быть использованы для определения зон воспламенения, горения летучих и горения коксового остатка в топках паровых котлов, сжигающих натуральное багасо в факеле.

4.4. Математическое моделирование горения коксовой частицы багасо

Математическое описание процессов, происходящих в топках паровых котлов, имеет большое значение для совершенствования конструкций топочных устройств.

Первые результаты по математическому моделированию процесса горения частицы натурального багасо были опубликованы в работах / 99, 100, 101 /, одним из авторов которых является

Таблица 4.3

Опытные коэффициенты для расчета продолжительности отдельных стадий
процесса горения частицы натурального бачаса

Стадия про- цесса горения	δ	Коэффициенты						Коэффициент эксплуатаци- онной корроз- ии R	Стандарт- ная ошибка аппроксимации
		K	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	
$\tau_{в.л.}$	δ_3^a	$216,16$ $\times 10^{-3}$	0,5623	0,4051	-0,6019	0,6229	-0,0749	4229	0,30
	$\delta_{F/V}$	$86,049$ $\times 10^{-3}$	0,5332	0,4170	-0,5993	0,6217	-0,0865	4226	0,31
$\Delta \tau_{г.л.}$	δ_3^a	$2,851$ $\times 10^3$	1,5161	0,6237	0	0	-0,2454	1177	0,16
	$\delta_{F/V}$	$2,563$ $\times 10^2$	1,4473	0,6311	0	0	-0,2640	1292	0,15
$\Delta \tau_{г.к.}$	δ_3^a	$402,91$ $\times 10^3$	1,2449	0,3415	-1,3340	0	-0,1829	287,6	0,23
	$\delta_{F/V}$	$43,519$ $\times 10^3$	1,1156	0,3262	-1,3733	0	-0,1903	251,3	0,29

диссертант. В работе /55/ приведено решение задачи о движении частицы натурального багаса в толще котла. "Рото" CV-25-18, однако автор не учитывал переменность массы частицы багаса, что дает приблизительную оценку траектории частицы. Более точные результаты можно получить, если учитывать уменьшение массы выгорающей частицы. Для расчета горения конусовой частицы багаса можно предложить следующую упрощенную модель, которая включает уравнения теплового и материального баланса конусовой частицы.

Уравнение теплового баланса горящей конусовой частицы, в предположении, что : частица имеет форму шара, отсутствует градиент температуры по сечению частицы ($Bi < 1$) и температура частицы превышает температуру газов ($T_K > T_r$), можно записать в виде:

$$Q_{\Sigma} = Q_p - Q_K - Q_{\lambda} - Q_g, \quad \frac{KBT}{M^2K} ; ; \quad (4.7)$$

где

$$Q_{\Sigma} = \frac{\rho_K \cdot C_K \cdot R_K \cdot dT_K}{\delta \cdot d\tau} \quad - \text{тепло, воспринимаемое час-}$$

тицей;

$$Q_p = Q_{HK} \cdot \beta \cdot CO_2 \cdot K_{эфф} \quad - \text{тепло, выделяющееся при го-}$$

рении конусовой частицы;

$$Q_K = \alpha_K (T_K - T_r) \quad - \text{тепло, отданное конвекцией};$$

$$Q_{\lambda} = \sigma_0 \alpha (T_K^4 - T_r^4) \quad - \text{тепло отданное излучением};$$

$$Q_g = C_r CO_2 K_{эфф} (T_K - T_r) \quad - \text{тепло, отведенное в ре-}$$

зультате диффузии продуктов сгорания.

Уравнение материального баланса имеет вид:

$$\frac{\rho_K}{2} \cdot \frac{d\delta_K}{d\tau} = - \beta \cdot CO_2 \cdot K_{эфф} \quad , \quad (4.8)$$

где

C_K - теплоемкость конуса багаса, $\frac{KJ}{K^{\circ}K}$;

- ρ_K - плотность коксовой частицы, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
 δ_K - диаметр шаровой коксовой частицы, м;
 Q_{HK}^P - теплота сгорания кокса баласа, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;
 β - стехиометрический коэффициент, $\frac{\text{кг кокса}}{\text{кг } \text{CO}_2}$;
 CO_2 - концентрация кислорода, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

$K_{эфф} = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{1}{L_g}}$ - эффективная константа скорости горения, м/с;

- K - константа скорости реакции, м/с ;
 L_g - коэффициент диффузионного массообмена, м/с;
 L_K - коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;
 T_r - температура потока газов, К;
 C_r - теплоемкость газов, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;
 α - степень чистоты частицы, принимаемая равной 0,895 по /99/.

Таким образом, можно составить систему дифференциальных уравнений, описывающую при указанных допущениях процесс горения коксовой частицы:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\delta_K C_K \rho_K}{6} \frac{dT_K}{d\tau} &= Q_{HK}^P \cdot \beta \cdot \text{CO}_2 K_{эфф} - L_K (T_K - T_r) - \\
 &\quad - \sigma_0 \cdot \alpha (T_K^4 - T_r^4) - C_r \cdot \text{CO}_2 K_{эфф} (T_K - T_r) \\
 \frac{\rho_K}{2} \frac{d\delta_K}{d\tau} &= - \beta \text{CO}_2 \cdot K_{эфф}
 \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Движение выгорающей одиночной частицы в газовом потоке описывается уравнением Мещерякова /59/:

$$m \frac{dv}{d\tau} = \sum_{i=1}^K P_i + (W_p - v) \frac{dm}{d\tau} , \quad (4.10)$$

где m , v - масса и скорость частицы;

$\sum_{i=1}^K P_i$ - сумма всех воздействующих сил;

W_p - скорость продуктов сгорания, отбрасываемых от частицы.

Для решения системы дифференциальных уравнений (4.9) была составлена программа на языке Бейсик на основе метода Рунге-Кутты.

На рис. 4.11 представлены зависимости Q_p , Q_k , Q_l , Q_d и Q_z от диаметра частицы. Все они увеличиваются при уменьшении диаметра конусовой частицы. Для наших условий лучистый теплообмен превышает конвективный примерно в 20 раз.

Расчеты коэффициентов α_d и α_k и диффузионно-химического критерия Пуссельта $Ni = \frac{\alpha_k}{\alpha_d}$ для частицы с эквивалентным диаметром $\delta_{ок} = 5,456 \times 10^{-3}$ м (рис. 4.12), показали, что во всем диапазоне диаметра этой частицы критерий Ni составляет больше 10, что характерно для диффузионной области горения [59]. Подобные результаты были получены и для других диаметров рассматриваемого диапазона конусовых частиц.

Коэффициенты теплопередачи конвективной α_k и излучения α_d при уменьшении размера частицы возрастают, т.е. одновременно возрастают теплоемкость и теплоотвод.

На этом же рисунке приведено значение температуры частицы, которая возрастает при уменьшении диаметра частицы. Сходные результаты по значению температуры частицы приведены в [45] при решении математической модели горения угольной пыли.

На рисунках 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 приведены времена горения конусовой частицы натурального бачеса в зависимости от температуры потока, скорости потока и концентрации кислорода

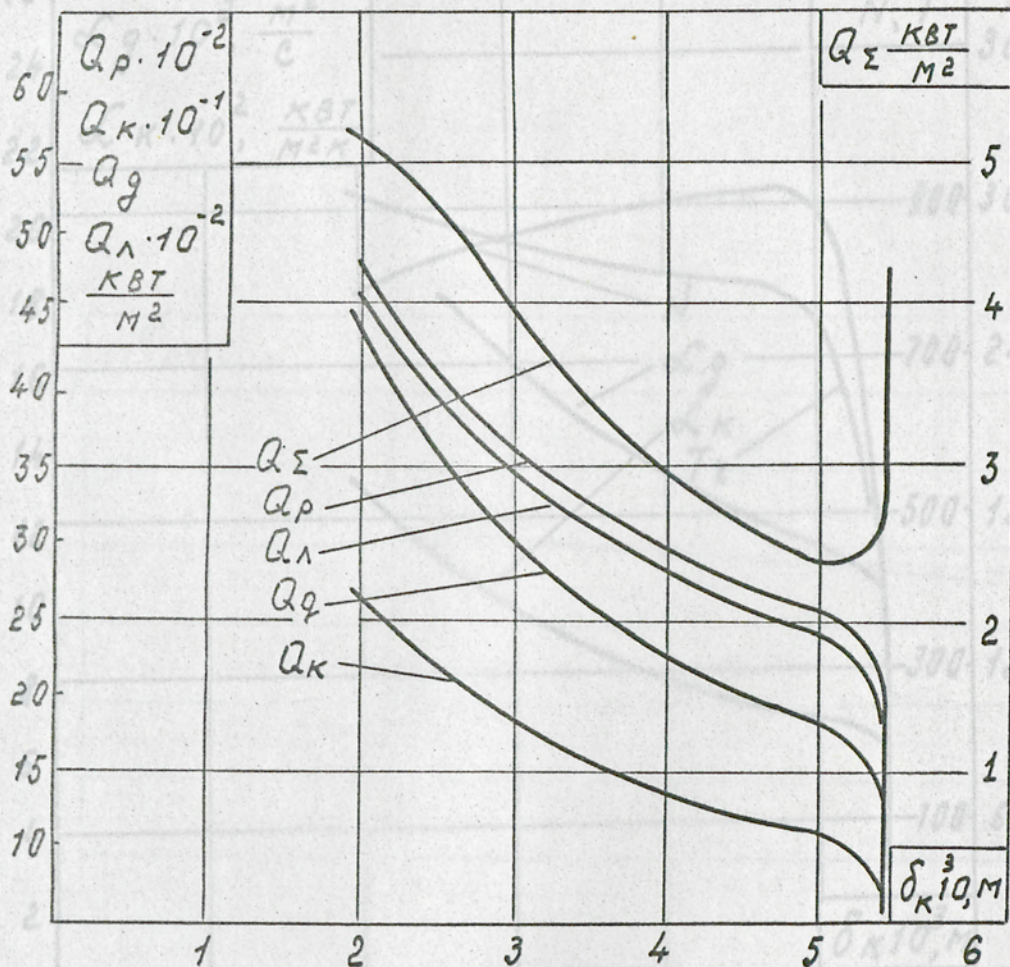


Рис.4.II. Зависимость Q_p , Q_k , Q_g , Q_l и Q_Σ от δ_k для коксовой частицы с начальным диаметром $\delta_{ок} = 5,455 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

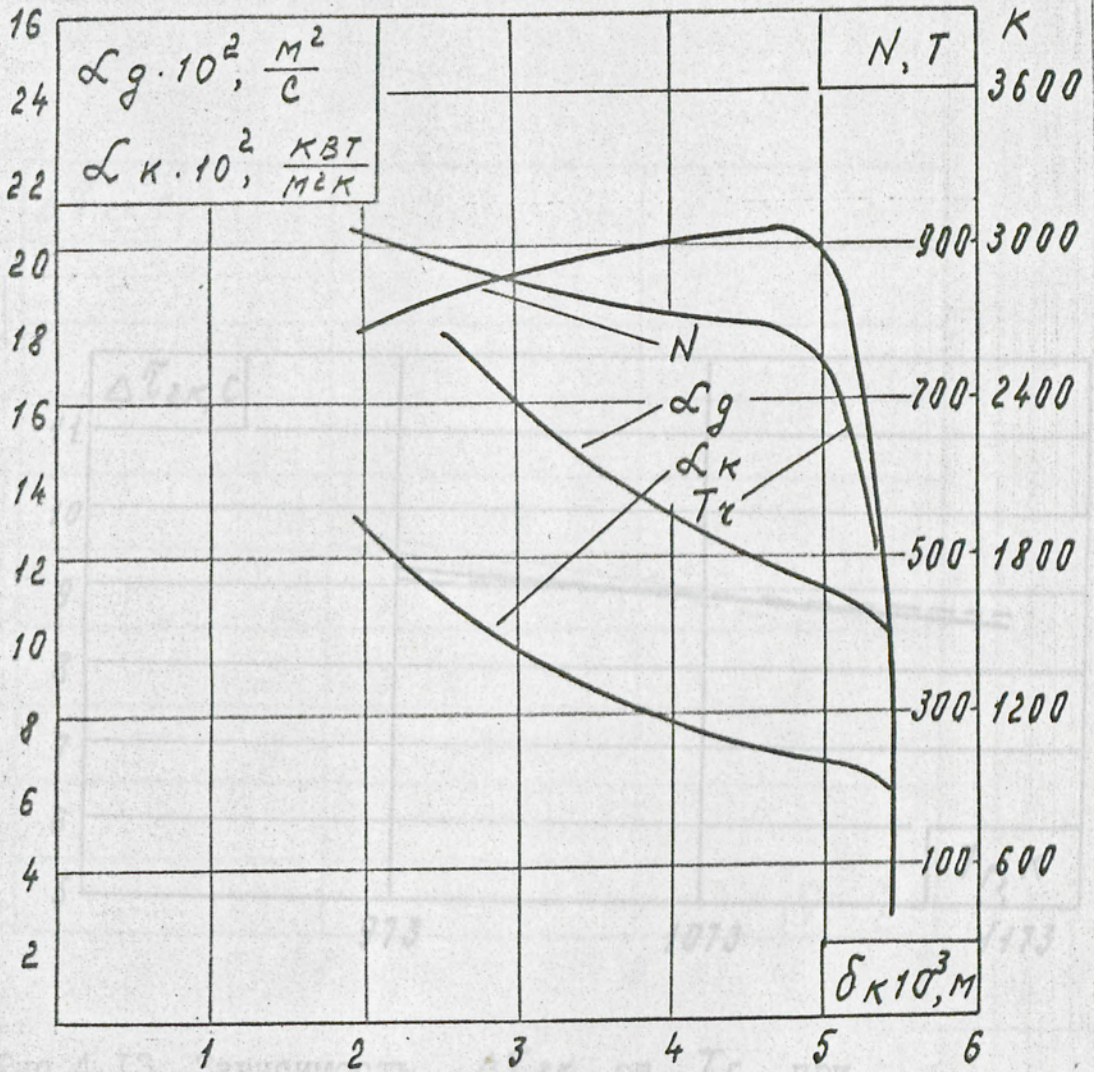


Рис.4.12. Зависимость L_g , L_k , T_z и N от δ_k для коксовой частицы с начальным диаметром $\delta_{0k} = 5,455 \cdot 10^3 \text{ м}$.

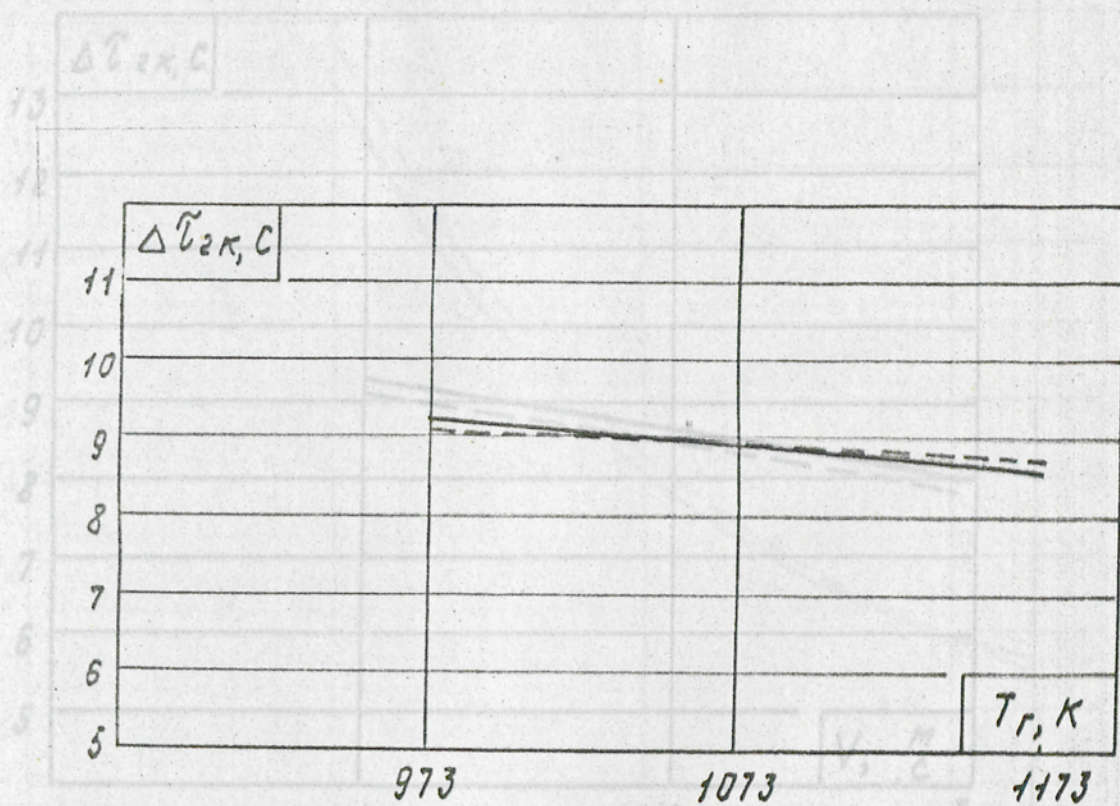


Рис.4.13. Зависимость $\Delta T_{гк}$ от $T_{гк}$ при
 $\delta_{ок} = 5,455 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $V = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $CO_2 = 21\%$

--- расчет по эмпирической зависимости
 ——— расчет по математической модели.

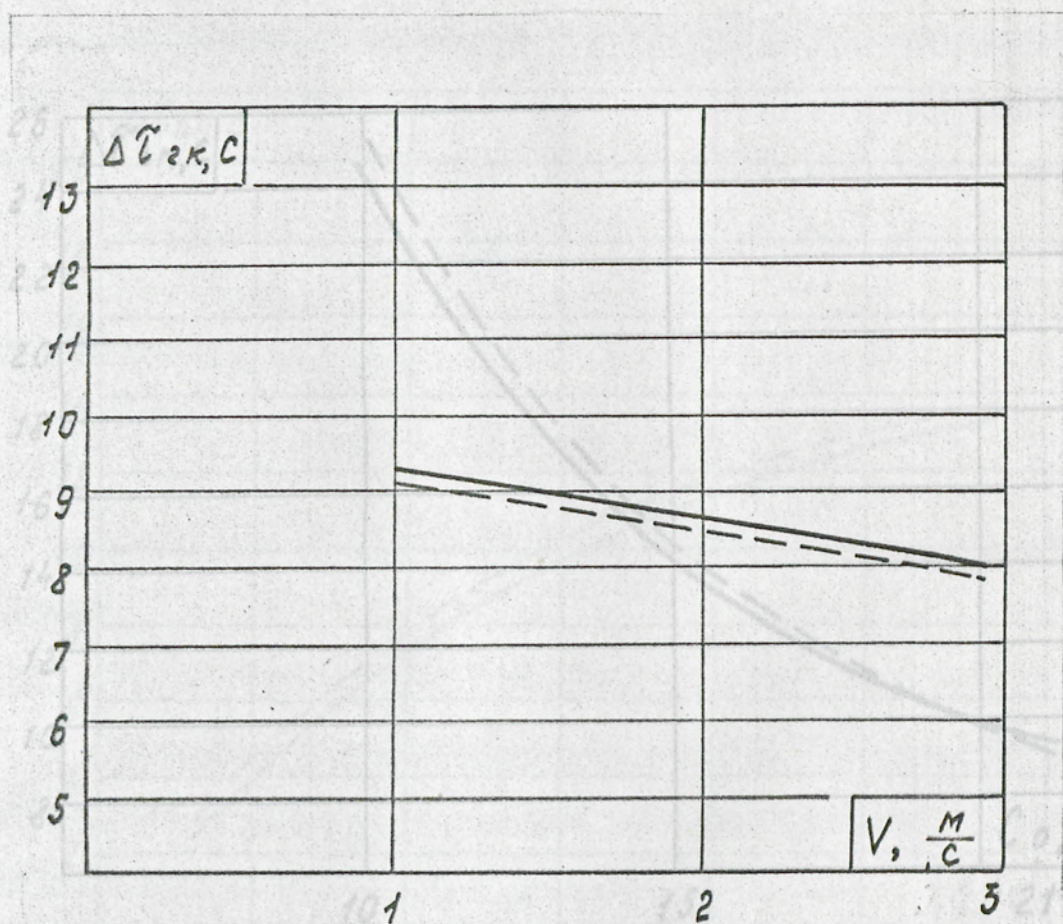


Рис.4.14. Зависимость $\Delta T_{2к}$ от V при $\sigma_{ок} = 5,455 \cdot 10^{-3}$ м, $CO_2 = 21\%$ $T_r = 973$ К

--- расчет по эмпирической зависимости
 ——— расчет по математической модели.

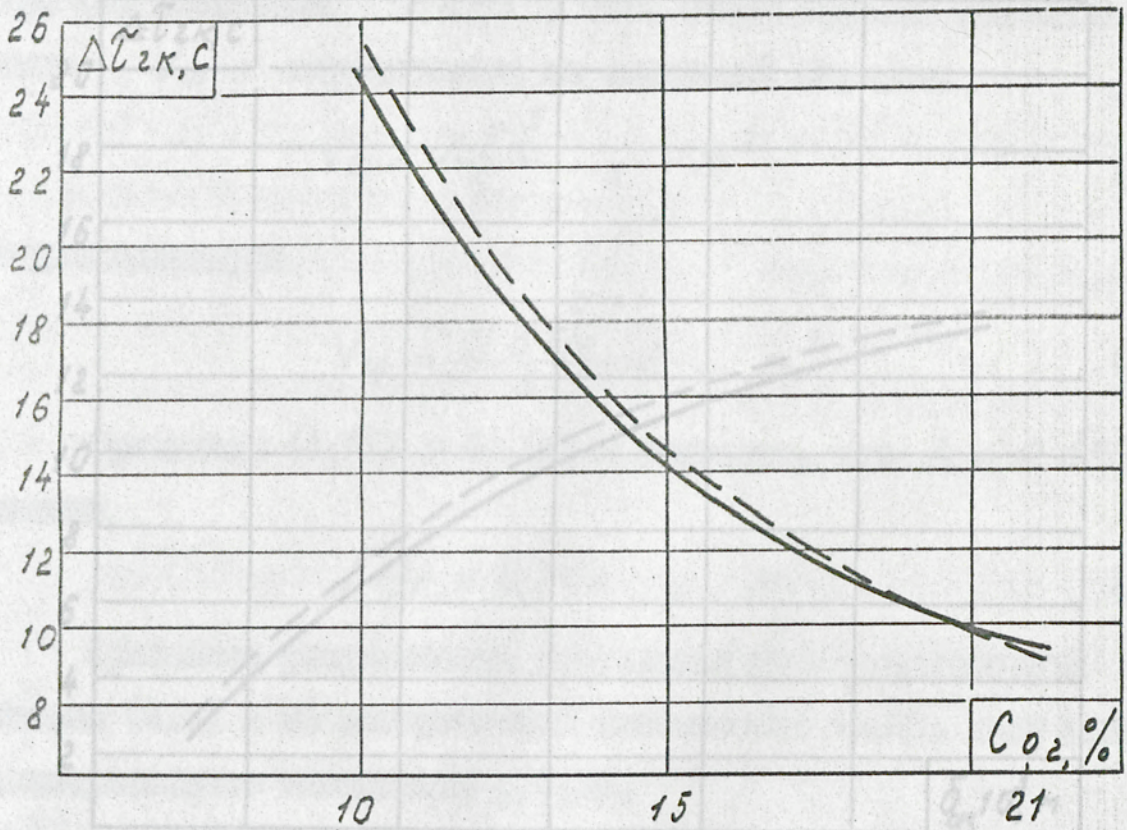


Рис.4.15. Зависимость ΔT_{2K} от CO_2 при $\delta_{OK} = 5,455 \cdot 10^{-3}$ м, $V = 1 \frac{M}{C}$, $T_r = 973$ К

--- расчет по эмпирической зависимости;
 — расчет по математической модели.

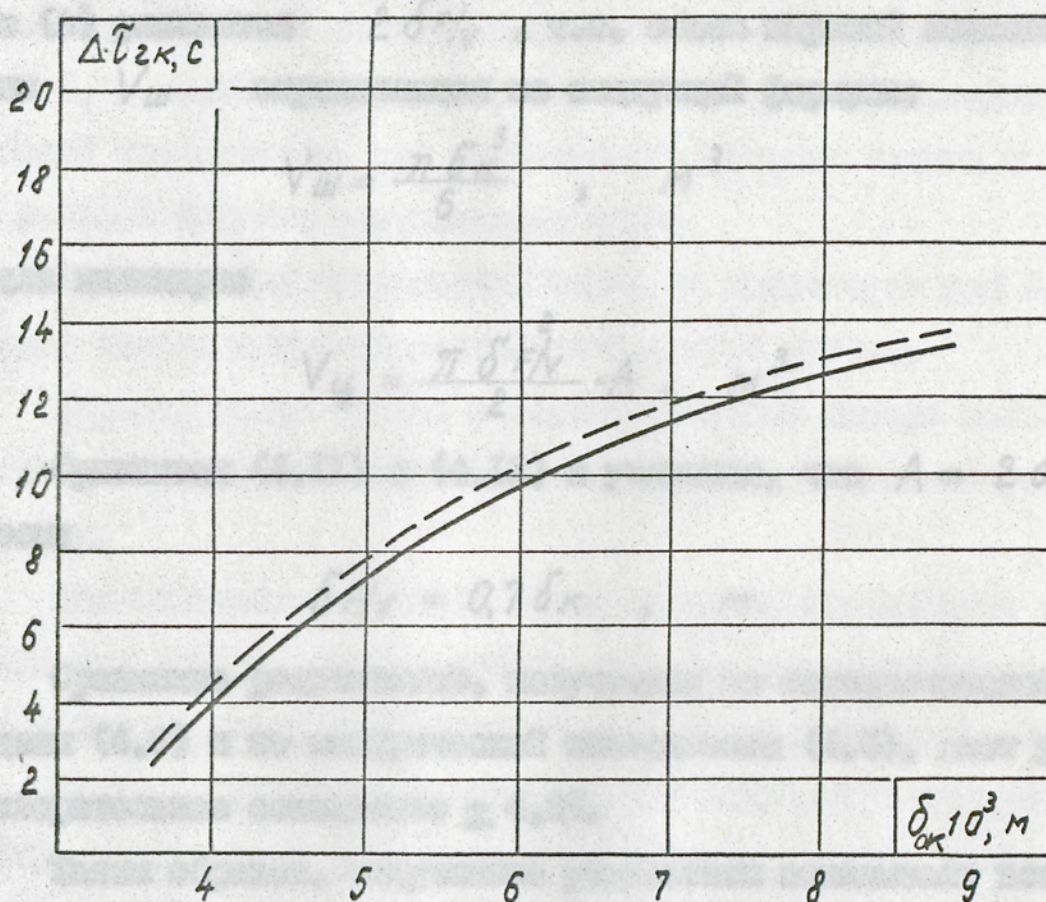


Рис.4.16. Зависимость ΔT_{2K} от $\delta_{ок}$ при $CO_2 = 21\%$, $V = 1 \frac{M}{C}$, $T_r = 973 K$.

--- расчет по эмпирической зависимости
 ——— расчет по математической модели.

в потоке, а также от начального диаметра частицы в диапазоне изменения параметров: $V = 1,2$ и 3 м/с; $T_r = 973, 1073$ и 1173 К; $CO_2 = 10, 15$ и 21% ; $\delta_{ок} = 2,5 \times 10^{-3}$, $5,45 \times 10^{-3}$ и $8,987 \times 10^{-3}$ м.

Для определения времени выгорания коксовой частицы по эмпирической формуле 4.6 был рассчитан диаметр эквивалентного цилиндра по объему в предположении, что высота цилиндра (A) равняется $2 \delta F/V$, т.е. объем шаровой коксовой частицы $V_{ш}$ определяется по следующей формуле:

$$V_{ш} = \frac{\pi \delta \kappa^3}{6}, \quad \text{м}^3 \quad (4.11)$$

и для цилиндра:

$$V_{ц} = \frac{\pi \delta^2 F/V}{2} \cdot A, \quad \text{м}^3 \quad (4.12)$$

Сравнивая (4.11) и (4.12) и учитывая, что $A = 2 \delta F/V$ имеем:

$$\delta F/V = 0,7 \delta \kappa, \quad \text{м.} \quad (4.13)$$

Сравнение результатов, полученных по математической модели (4.9) и по эмпирической зависимости (4.6), дает удовлетворительное совпадение $\pm 4,2\%$.

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность использования предложенной математической модели (системы дифференциальных уравнений (4.9)) для расчета процесса выгорания коксовой частицы натурального боксита в условиях топок котлов, сжигающих это топливо во взвешенном состоянии.

4.5. Расчет горения коксовой частицы натурального боксита в топке котла Рого $CV-25-18$

Горение кокса натурального боксита является гетерогенным процессом, при котором одновременно происходит горение угле-

рода на поверхности и в глубине частицы и диффузия кислорода и продуктов сгорания. В зависимости от условий развития процесса горения (температуры среды, размера частицы и содержания влаги в топливе) можно рассматривать три схемы горения углерода частиц багассо /59/:

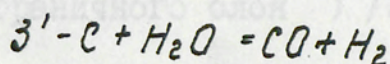
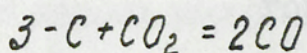
1. горящий пограничный слой; он имеет место при сравнительно невысоких температурах, для относительно небольших частиц и небольшой толщине пограничного слоя частиц;

2. двойной горящий пограничный слой; он существует при высокой температуре, для относительно больших частиц и довольно большой толщине пограничного слоя;

3. негорящий пограничный слой; он характерен для горения малых частиц и при невысокой температуре потока.

Горение кокса багассо в объеме топочной камеры котла Рето, в основном, происходит по схеме двойного горящего пограничного слоя.

Как отмечается в /59/, при сжигании высоковолажных топлив, таких как багассо, можно считать, что концентрации водяных паров в потоке газов достаточно большая и по реакции $C + H_2O = CO + H_2$ образуется значительное количество водорода и оксида углерода. В этих условиях диффундирующий и углеродной частице кислород расходуется в пределах приведенной пленки на реакцию с водородом $4' - 2H_2 + O_2 = 2H_2O$, а CO догорает в потоке дымовых газов. При этом кислород не достигает поверхности частицы. Горение углеродной частицы происходит по восстановительным реакциям:



Считая приведенную пленку конусовой частицы багассо плоской т.е., пренебрегая кривизной ее поверхности (рис. 4.17),

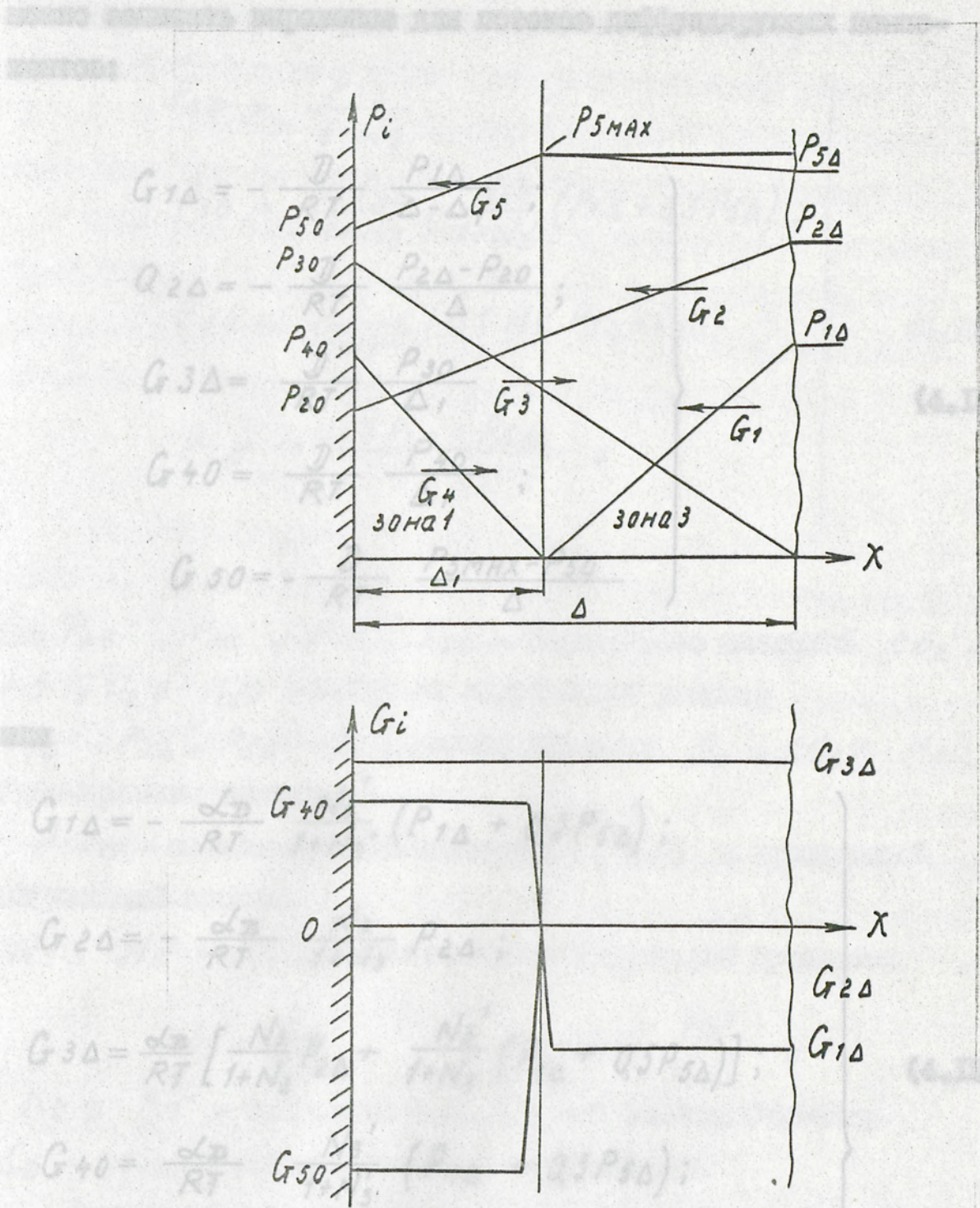


Рис.4.17. Распределение порционных давлений и потоков компонентов в приведенной пленке при наличии водяных паров в потоке газов (схема двойного горящего пограничного слоя) /59/.

$$G_c = \frac{d\Delta}{RT} \left[\frac{N_1}{1+N_1} P_{2\Delta} + \frac{N_2}{1+N_2} (P_{1\Delta} + 0.5P_{5\Delta}) \right]$$

можно записать выражение для потоков диффундирующих компо-
нентов:

$$\left. \begin{aligned} G_{1\Delta} &= - \frac{D}{RT} \frac{P_{1\Delta}}{\Delta - \Delta_1} ; \\ Q_{2\Delta} &= - \frac{D}{RT} \frac{P_{2\Delta} - P_{20}}{\Delta} ; \\ G_{3\Delta} &= \frac{D}{RT} \frac{P_{30}}{\Delta_1} ; \\ G_{40} &= \frac{D}{RT} \frac{P_{40}}{\Delta_1} ; \\ G_{50} &= - \frac{D}{RT} \frac{P_{5\text{MAX}} - P_{50}}{\Delta} \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

или

$$\left. \begin{aligned} G_{1\Delta} &= - \frac{L_D}{RT} \frac{N_3'}{1+N_3'} (P_{1\Delta} + 0,5 P_{5\Delta}) ; \\ G_{2\Delta} &= - \frac{L_D}{RT} \frac{N_3}{1+N_3} P_{2\Delta} ; \\ G_{3\Delta} &= \frac{L_D}{RT} \left[\frac{N_3}{1+N_3} P_{2\Delta} + \frac{N_3'}{1+N_3'} (P_{1\Delta} + 0,5 P_{5\Delta}) \right] ; \\ G_{40} &= \frac{L_D}{RT} \frac{N_3'}{1+N_3'} (P_{1\Delta} + 0,5 P_{5\Delta}) ; \\ G_{50} &= - \frac{L_D}{RT} \frac{2 N_3'}{1+N_3'} (P_{1\Delta} + 0,5 P_{5\Delta}) ; \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

и для потока углерода

$$G_c = \frac{L_D}{RT} \left[\frac{N_3}{1+N_3} P_{2\Delta} + \frac{N_3'}{1+N_3'} (P_{1\Delta} + 0,5 P_{5\Delta}) \right]$$

Выражения для парциальных давлений имеют вид

$$\left. \begin{aligned} P_{20} &= \frac{P_{2\Delta}}{1+N_3} ; \\ P_{30} &= \frac{N_3 P_{2\Delta}}{1+N_3} + \frac{N_3'}{1+N_3'} (P_{1\Delta} + 0.5 P_{5\Delta}) ; \\ P_{40} &= \frac{1}{1+N_3'} (0.5 N_3' P_{5\Delta} - P_{1\Delta}) ; \\ P_{50} &= \frac{2 P_{1\Delta} + P_{5\Delta}}{1+N_3'} , \end{aligned} \right\} (4.16)$$

где P_{20} , P_{30} , P_{40} , P_{50} - парциальные давления CO_2 , CO , H_2 и H_2O в пределах пограничной пленки;

$P_{1\Delta}$, $P_{2\Delta}$, $P_{5\Delta}$ - парциальные давления O_2 , CO_2 и H_2O у поверхности частицы;

P_{5max} - максимальная концентрация H_2O в приведенной пограничной пленке.

N_3 , N_3' - диффузионно-химический критерий Нуссельта

$$N_3 = \frac{K_3}{L_D} , \quad \text{и} \quad N_3' = \frac{K_3'}{L_D} ,$$

K_3 и K_3' - константы 3-ей и 3'-ей реакции горения;

L_D - коэффициент диффузионного массообмена.

Расчет горения коксовой частицы натурального багассо проводим в предположении, что отсутствует температурный градиент по сечению частицы.

Предварительная оценка показала, что в точном объеме могут гореть частицы багассо с начальным диаметром $\delta_{0r} \leq 7 \times 10^{-3}$ м, т.е. примерно 73% от общего расхода багассо в

топку. Они имеют скорость вращения ($\omega_{\text{врт}} \leq 1,9 \text{ м/с}$) меньшее средней скорости газов в поперечном сечении топки ($W_r \approx 2 \text{ м/с}$). Для определения скорости вращения частиц бугаса была использована методика, приведенная в разделе 3.1.3.

Зерновая характеристика бугаса, получена при испытаниях (рис. 2.5), была разделена на 4 равных интервала так, чтобы весовое количество бугаса (ΔD) во всех интервалах было одинаковым. Из зерновой характеристики получим $R_7 = 27\%$ и:

$$\Delta D = \frac{100-27}{4 \times 100} = 0,1825 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Затем делим массу топлива для $\delta_{0T} \leq 7 \times 10^{-3} \text{ м}$ на 4 фракции, массы которых одинаковы, что дает граничные размеры: $7 \times 10^{-3} < \delta_{0T1} < 4 \times 10^{-3} \text{ м}$; $4 \times 10^{-3} < \delta_{0T2} < 2,2 \times 10^{-3} \text{ м}$; $2,2 \times 10^{-3} < \delta_{0T3} < 1 \times 10^{-3} \text{ м}$; $1 \times 10^{-3} < \delta_{0T4} < 0$. Характерные размеры частиц для каждого диапазона были определены по выражению 3.19, а их эквивалентные диаметры δ_3^a — по формуле 3.26. Для каждой частицы был определен диаметр эквивалентного шара. Начальная плотность конусовой частицы бугаса была определена по выражению:

$$\rho^k = \rho^c \frac{100 - V^c}{100} ; \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad (4.17)$$

где ρ^c — плотность частицы бугаса на сухую массу, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; V^c — содержание летучих бугаса на сухую массу, %.

В табл. 4.4 приведены характерные размеры для четырех фракций, выгорающих в топочном объеме.

Для расчета процесса горения были использованы экспериментальные данные по средней температуре потока в топке и концентрации кислорода и двуокиси углерода в ней, полученные в разделах 2.2.3 и 2.2.4. Опытная температура газов на выходе из топки была уточнена по результатам обработки балансовых

Таблица 4.4

Характеристики частиц выгоревших в точном объеме

Размер частиц	Величины			
δ_{OT} , м	7×10^{-3}	4×10^{-3}	$2,2 \times 10^{-3}$	1×10^{-3}
A, м	$22,5 \times 10^{-3}$	$17,73 \times 10^{-3}$	$14,6 \times 10^{-3}$	$12,96 \times 10^{-3}$
B, м	$3,94 \times 10^{-3}$	$2,52 \times 10^{-3}$	$1,55 \times 10^{-3}$	$0,83 \times 10^{-3}$
C, м	$1,84 \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^{-3}$	$0,87 \times 10^{-3}$	$0,52 \times 10^{-3}$
δ_{Σ}^2 , м	$0,688 \times 10^{-3}$	$0,46 \times 10^{-3}$	$0,31 \times 10^{-3}$	$0,18 \times 10^{-3}$
δ_w , м	$6,78 \times 10^{-3}$	$4,78 \times 10^{-3}$	$3,37 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-3}$
ρ_K , $\frac{кг}{м^3}$	42,52	40,56	49,7	51,74

опытов методом обратного баланса. В рис. 4.18 приведены зависимости концентрации O_2 и CO_2 и температуры газов по высоте точки, использованные в расчетах.

При рассмотрении выгорания конусных частиц в объеме точки вся длина факела была разделена на 3 участка l_1 , l_2 и l_3 (рис. 4.19).

Для определения сечения точки, где начинается процесс горения конуса для каждой частицы, была определена продолжительность стадий до воспламенения летучих и горения летучих по эмпирической формуле, полученной в разделе 4.3 при температуре, концентрации кислорода и скорости газов в зоне точки $\frac{h_T}{H_T} = 0,15$ (табл. 4.5). Затем были определены координаты частицы в начале горения конуса по выражениям:

$$x = x_0 + \omega_x \tau + \frac{1}{b} (\omega_x + v_{x0}) (e^{-b\tau} - 1); \quad (4.18)$$

$$y = y_0 + (\omega_y - g/b) \tau + \frac{1}{b} (\omega_y - g/b - v_{y0}) (e^{-b\tau} - 1), \quad (4.19)$$

где v_{x0} , v_{y0} , x_0 , y_0 — составившие скорости и координаты частицы в начальный момент времени $\tau = 0$, т.е. в заборнике багаса; для наших условий $v_{x0} = 11$ м/с, $v_{y0} = 0$, $x_0 = 0$, $y_0 = 1,2$ м;

ω_x , ω_y — составившие скорости потока, м/с для наших условий $\omega_x = 0$, $\omega_y = 2,2$ м/с;

$$b = \frac{12 \nu f \rho_r}{\delta_3^2 m};$$

ν — коэффициент кинематической вязкости газов, $\frac{м^2}{с}$;

f — площадь мидоля сечения частицы, $м^2$;

ρ_r — плотность газов, $\frac{кг}{м^3}$;

m — масса частицы, кг.

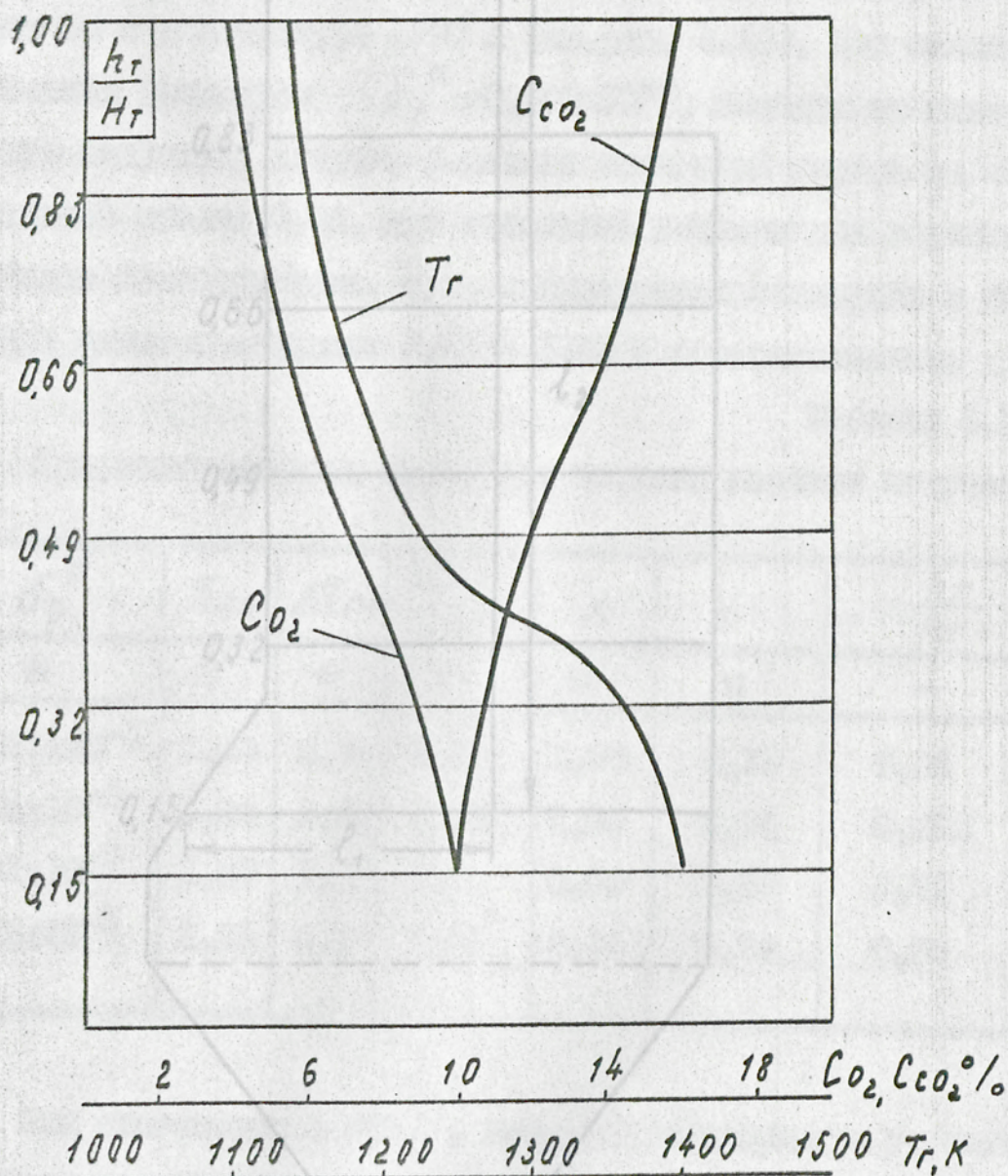


Рис. 4.18. Изменение концентрации O_2 и CO_2 и температуры газов по высоте топки.

Рис. 4.19. Длина пакета в топке котла Рето CV-25-18.
 $l_1 = 2160$ мм, $l_2 = 6780$ мм, $l_3 = 1800$ мм.

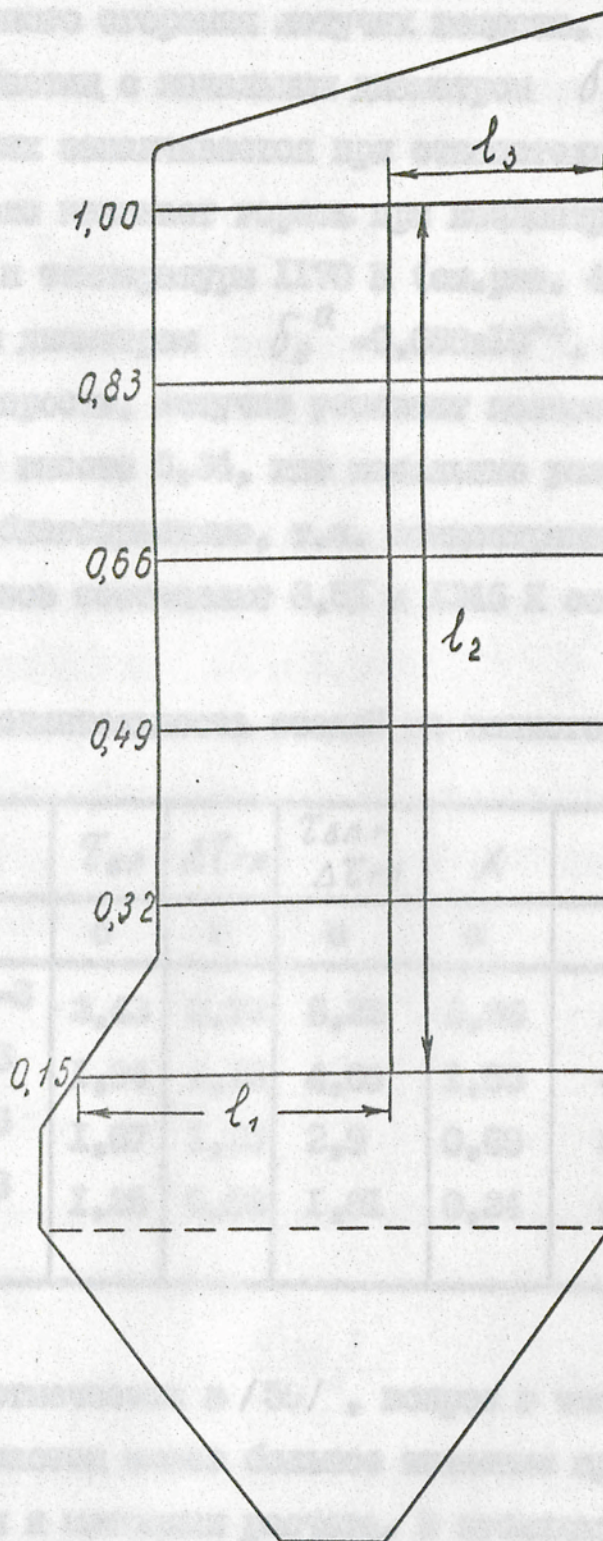


Рис. 4.19. Длина факела в топке котла Рето CV-25-18.

$l_1 = 2460$ мм, $l_2 = 6780$ мм, $l_3 = 1800$ мм.

В таблице 4.5 приведены расчетные координаты частиц после полного сгорания летучих веществ. Расчеты показали, что для частиц с начальным диаметром $\delta_3^a = 0,31 \times 10^{-3}$ м горение летучих заканчивается при относительной высоте точки 0,71 и кокс начинает гореть при концентрации кислорода примерно 5% и температуры 1170 К (см. рис. 4.18). Для частиц с начальным диаметром $\delta_3^a = 0,688 \times 10^{-3}$ м, имеющих меньшую абсолютную скорость, летучие успевают полностью гореть на относительной высоте 0,34, где начальные условия для горения кокса более благоприятные, т.е. концентрация кислорода и температура газов составляют 8,5% и 1345 К соответственно.

Таблица 4.5

Продолжительность стадий до полного горения летучих

δ_3^a	$\tau_{вл}$	$\Delta \tau_{гл}$	$\tau_{вл} + \Delta \tau_{гл}$	X	Y	$\frac{h\tau}{H\tau}$
м	с	с	с	м	м	—
$0,688 \times 10^{-3}$	2,43	3,79	6,22	2,66	2,73	0,34
$0,46 \times 10^{-3}$	1,94	2,15	4,09	1,53	4,94	0,612
$0,31 \times 10^{-3}$	1,67	1,23	2,9	0,69	5,68	0,71
$0,18 \times 10^{-3}$	1,25	0,56	1,81	0,24	4,74	0,59

Как отмечается в [59], вопрос о температуре горящих коксовых частиц имеет большое значение при определении области горения и методики расчета. В публикациях нет экспериментальных данных о температуре горящих коксовых частиц натурального базиса. Для наших расчетов приблизительно можно оценить повышение температуры частицы над температурой газового потока по результатам решения системы дифференциальных уравне-

ний 4.9 при условиях топочной камеры. На рис. 4.20 представлены значения температуры частиц и газов по высоте факела.

Коэффициент диффузии будем рассчитывать по формуле Винкельмана:

$$D = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,75} \frac{P_0}{P} \cdot \frac{M^2}{c}, \quad (4.20)$$

где D_0 - приведенный коэффициент взаимной диффузии для состава газов в точке котла "Рето" при нормальных условиях ($P_0 = 1,01 \times 10^5$ Па, $T_0 = 273$ К).

Для аналогичного случая выгорания высоковлажного древесного топлива Шестаков С.М. [60] рекомендует следующее значение коэффициента диффузии $D_0 = 0,149 \times 10^{-4} \frac{m^2}{c}$.

Для наших условий значения критерия Рейнольдса не достигают единицы (см. приложение 5), что позволяет использовать упрощенную формулу Сокольского и Тимофеевой для определения критерия Нуссельта (теплового и диффузионного):

$$Nu = 2 + 0,16 Re^{2/3}; \quad (4.21)$$

где

$$Re = \frac{\omega_{\text{вх}} \delta_z^a}{\nu}$$

Коэффициент диффузионного обмена легко определяется по известной зависимости:

$$L_D = \frac{Nu_D D}{\delta_z^a}, \text{ м/с} \quad (4.22)$$

При определении энергии активации различных реакций были приняты следующие отношения [59]:

$$\frac{E_2}{E_1} = 1,1; \quad \frac{E_3}{E_1} = 2,2; \quad \frac{E_3'}{E_1} = 1,6,$$

где E_1 и E_2 энергии активации реакций $1-C + O_2 = CO_2$ и $2-2C + O_2 = 2CO$ соответственно.

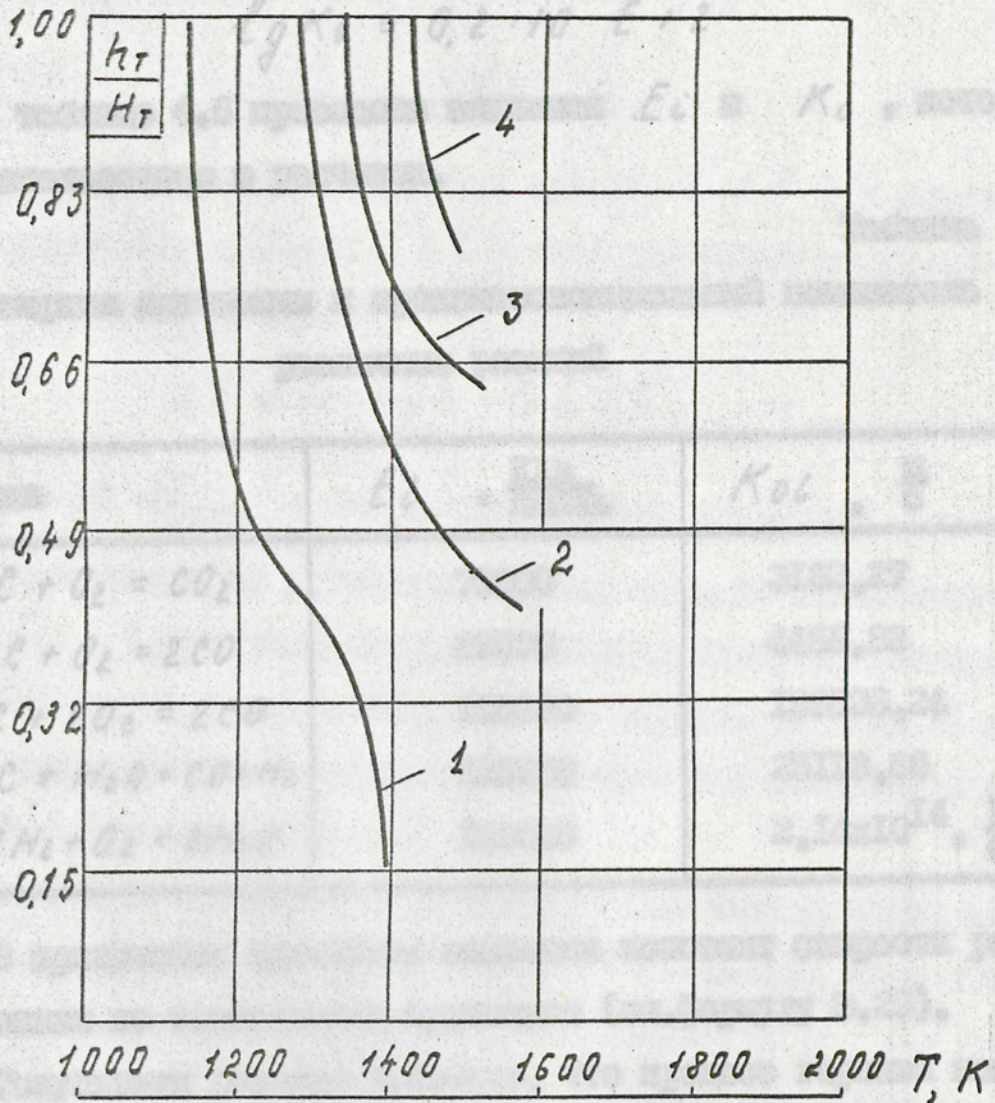


Рис. 4.20. Зависимость температуры коксовых частиц и газов по высоте топки.

- 1 - температура газов;
- 2 - частицы с начальным диаметром $\delta_3^a = 0,668 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
- 3 - частицы с начальным диаметром $\delta_3^a = 0,46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- 4 - частицы с начальным диаметром $\delta_3^a = 0,31 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Используя выражение, предложенное Пестановым С.И. /59/, находим предэкспоненциальный множитель

$$\lg K_0 = 0,2 \cdot 10^{-4} E + 2 \quad (4.23)$$

В таблице 4.6 приведены значения E_i и K_0 , которые были использованы в расчетах.

Таблица 4.6

Энергия активации и предэкспоненциальный показатель различных реакций

Реакции	E_i , Ккал/моль	K_0 , $\frac{м}{с}$
1. $C + O_2 = CO_2$	75000	3162,27
2. $2C + O_2 = 2CO$	82500	4466,83
3. $C + CO_2 = 2CO$	165000	199536,24
3'. $C + H_2O = CO + H_2$	120000	25118,96
4. $2H_2 + O_2 = 2H_2O$	129000	$2,14 \times 10^{14} \cdot \frac{1}{8}$

В приложении приведены значения констант скорости реакции, полученных по зависимости Аррениуса (см. формулу 3.29).

Результаты расчета показали, что процесс горения угольковых частиц натурального сахара в объеме топки котла "Рето" происходит в диффузионной ($N_1 + N_2 > 10$) и промежуточной

($0,1 \leq N_1 + N_2 \leq 10$) областях и кислород не достигает поверхности частиц, т.е. $\bar{P}_{1\Delta} < 0,5 N_3 P_{5\Delta}$. Так как значения критерия

Семенова $Se = \frac{\sqrt{K_4 \cdot D}}{L \cdot D}$ больше 100, то для анализа можно применить схему двойного горючего пограничного слоя (см. приложение 5).

Время пребывания частиц ($\Delta \tau$) в каждой зоне топки было рассчитано, исходя из скорости частиц ($\bar{W}_r - \omega_{but}$) (см. приложение 5).

Если процесс горения происходит в диффузионной области, то скорость выгорания углерода можно определять по упрощенной формуле:

$$G_c = \frac{\alpha_d}{RT} P_{1\Delta} \quad (4.24)$$

Уменьшение диаметра коксовой частицы ($\Delta\delta$) в определенном промежутке времени ($\Delta\tau$) было рассчитано по уравнению выгорания шаровой частицы:

$$\Delta\delta = - \frac{2M_c}{\rho_k} \cdot G_c \cdot \Delta\tau, \quad \text{м}, \quad (4.25)$$

где $M_c = 12 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ — молекулярная масса углерода.

В выражении 4.25 учитывали диаметр шара по эквивалентному объему δ_w . При численном уменьшения характерных размеров частиц было сделано допущение, что при горении частицы ее длина L мало изменяется, т.е. уменьшаются только два поперечных размера B и C (см. приложение 5).

В рис. 4.21 приведены кривые выгорания частиц кокса натурального батаса в топке котла "Рето" (CV-25-18). Конусовые частицы с начальными диаметрами $\delta_3^a = 0,63 \times 10^{-3}$ м и $\delta_3^a = 0,46 \times 10^{-3}$ м горят в пределах топочной камеры до диаметра $0,5 \times 10^{-3}$ м и $0,32 \times 10^{-3}$ м (примерно на 1,4 раза меньше). Другие результаты получали для частиц с начальным диаметром $\delta_3^a = 0,31 \times 10^{-3}$ м, которые успевают гореть в топке до диаметра $0,12 \times 10^{-3}$ м, т.е. 2,5 раз меньше.

Расчет выгорания коксовой частицы натурального батаса в объеме топки котла "Рето" был положен в основу расчета потерь топлива с механическим недогомом q_4 . Величину механического недогома на выходе из топки можно определять по выражению:

$$q_4 = 100 \frac{Q_k}{Q_p} K_p \sum_{i=1}^{n_{\phi p}} \left(\frac{\delta_i}{\delta_{oi}} \right)^3 \Delta J_{oi}, \quad (4.26)$$

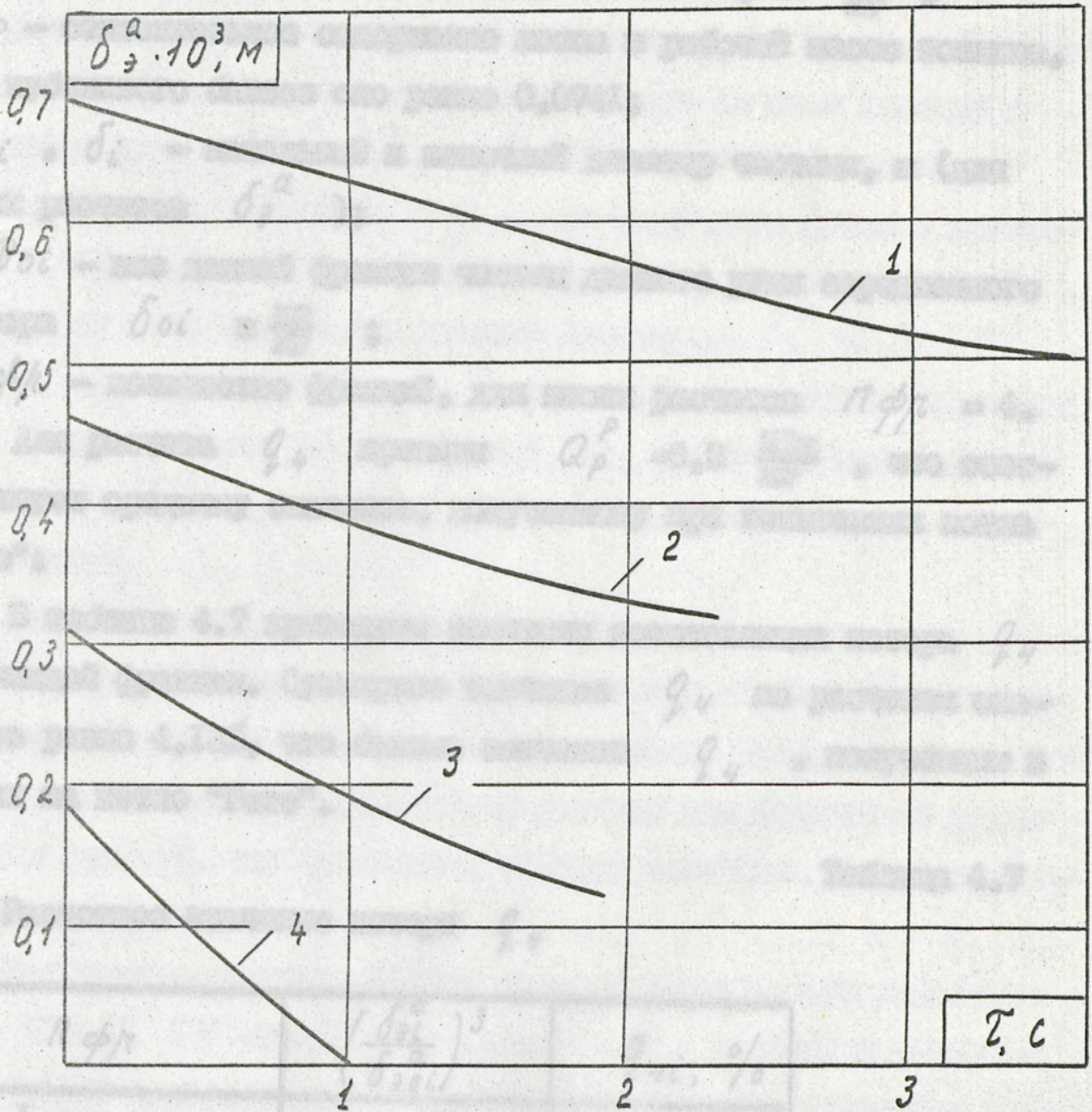


Рис. 4.21. Кривые выгорания частиц кокса багасо в топке котла Рето CV-25-18.

- 1 - начальный диаметр $\delta_3^a = 0,688 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- 2 - начальный диаметр $\delta_3^a = 0,46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- 3 - начальный диаметр $\delta_3^a = 0,31 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- 4 - начальный диаметр $\delta_3^a = 0,18 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

где Q_k — количество тепла, выделяющегося при сжигании I кг
конса, оно составляет для конса древесины 32,782 $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$;

K_p — относительное содержание конса в рабочей массе топлива,
для кубинского сагассо оно равно 0,0741;

δ_{oi} , δ_i — начальный и конечный диаметр частицы, м (для
наших расчетов δ_{3i}^a) ;

ΔD_{oi} — вес данной фракции частиц данного угля осредненного
размера δ_{oi} в $\frac{\text{кг}}{\text{кг}}$;

$n_{ф/г}$ — количество фракций, для наших расчетов $n_{ф/г} = 4$.

Для расчета q_4 приняты $Q_p^p = 8,3 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$, что соот-
ветствует среднему значению, полученному при сжигании конса
"Рето":

В таблице 4.7 приведены значения составляющих потерь q_4
для каждой фракции. Суммарное значение q_4 по расчетам оказ-
алось равно 4,13%, что близко значению q_4 , полученным в
опытах на котле "Рето".

Таблица 4.7

Расчетное значение потерь q_4

$n_{ф/г}$	$\left(\frac{\delta_{3i}^a}{\delta_{30i}^a}\right)^3$	$q_{4i}, \%$
$\delta_{301}^a = 0,688 \text{ мм}$ $\delta_{31}^a = 0,50 \text{ мм}$	0,38	2,03
$\delta_{302}^a = 0,46 \text{ мм}$ $\delta_{32}^a = 0,32 \text{ мм}$	0,536	1,79
$\delta_{303}^a = 0,31 \text{ мм}$ $\delta_{33}^a = 0,12 \text{ мм}$	0,058	0,31
$\delta_{304}^a = 0,18 \text{ мм}$ $\delta_{34}^a = 0$ ИТОГ	0 —	0 4,13%

Как показали расчеты механический подсос за счет частиц с начальным диаметром $\delta_3^a = 0,688 \times 10^{-3}$ м составляет 2,03 %, что достигает 50% от суммарного значения q_4 . Немного меньше влияние на величину q_4 оказывает подсос за счет фракции с начальным диаметром $\delta_3^a = 0,46 \times 10^{-3}$ м, который составляет 1,79%. Суммарное значение q_4 для этих двух фракций составляет 3,82%, т.е. 92% от полного значения q_4 . Механический подсос за счет частиц с начальным диаметром $\delta_3^a = 0,31 \times 10^{-3}$ составляет только 0,31%, т.е. примерно 8% от итогового значения q_4 . Как показали расчеты (рис.4.21), частицы с начальным диаметром $\delta_3^a = 0,18 \times 10^{-3}$ м успевают полностью сгореть в пределах топки.

Надо отметить, что аэродинамические характеристики натурального бугаса, а также его фракционный состав создают благоприятные условия для его сжигания в объеме топки. Однако аэродинамика топки не обеспечивает необходимые условия для полного сгорания крупных фракций, что приводит к высоким значениям потерь с механическим подсосом.

Полученные значения потерь тепла с механическим подсосом котла "Рото" CV -25-18 в расчетах ($q_4 = 4,13\%$) и в опытах ($q_4 = 4\%$) практически совпадают, что позволяет применить данную методику для расчета выгорания конусных частиц натурального бугаса в объеме топки.

4.6. Выводы по главе

1. Впервые проведены оценочные исследования процесса горения частиц натурального бугаса при условиях, характерных для топочных камер паровых котлов с горением бугаса во взвешенном состоянии. Они показали, что весь процесс горения частиц нату-

рального боксера может быть разделен на несколько стадий:

- стадию прогрева, сушки и выхода летучих веществ до их воспламенения ($\tau_{вл}$);
- стадию пламенного горения летучих веществ ($\Delta \tau_{гл}$);
- стадию горения коксового остатка ($\Delta \tau_{гк}$).

2. Обработка опытных данных позволила предложить эмпирические выражения для расчета продолжительности отдельных стадий в зависимости от размера, плотности и содержания влаги частицы и от температуры, скорости и концентрации кислорода газового потока. Они позволяют оценить распределение тепловыделений по высоте топки, сканализир боксера, исходя из его поперечных характеристик.

3. На продолжительность стадии до воспламенения летучих ($\tau_{вл}$) определяющее влияние оказывает содержание влаги и температура газового потока. Уменьшение содержания влаги частицы от 50 % до 15 % сокращает время до воспламенения летучих на 40-80% в зависимости от условий горения. Определяющее влияние температуры газового потока указывает, что прогрев частицы осуществляется по-видимому, за счет лучистого теплообмена.

4. Продолжительность стадии пламенного горения летучих ($\Delta \tau_{гл}$) зависит прежде всего, от диаметра частицы и в меньшей степени от температуры, т.к. приток тепла к частице происходит, в основном, от фазовых горючих летучих. Процесс сушки частицы натурального боксера в наших опытах заканчивался до воспламенения летучих, что определяет, таким образом, независимость этой стадии от содержания влаги в частице.

5. На продолжительность стадии горения коксового остатка ($\Delta \tau_{гк}$) наибольшее влияние оказывают диаметр частицы и концентрация кислорода, меньшее-температура газового потока. Зави-

силуosity $\Delta T_{2K} = f(\sigma_3^{1.245})$ показывает, что горение кокса происходит в промежуточной области.

6. Предложена упрощенная математическая модель горения коксового остатка багасо, которая учитывает уравнения теплового и материального баланса частицы. Она позволяет учитывать уменьшение массы выгоравшей частицы. Расчет времени продолжительности стадии горения коксовой частицы багасо по этой математической модели и по эмпирической формуле, полученной при обработке экспериментальных данных, дает удовлетворительное совпадение ($\pm 4,3\%$). Это свидетельствует о применимости предложенной методики.

7. Полученные результаты о влиянии различных факторов на продолжительность отдельных стадий процесса горения частицы натурального багасо являются сходными с результатами других исследований для частиц древесины и для прессованных частиц багасо, что свидетельствует о достоверности наших результатов.

8. Впервые проведен расчет горения коксовой частицы натурального багасо в объеме топки, в результате которого показано, что потери тепла с механическим надомом котла "Рето" CV-25-18 определяются неполным сгоранием фракций с начальным диаметром больше $\sigma_3^a = 0,46 \times 10^{-3}$ м. Коксовые частицы этих фракций горят при неблагоприятных условиях: концентрация кислорода меньше 8,5%, температура газов ниже 1350 К, время пребывания частиц в топке мало и составляет примерно 9,7 и 6,4 с, причем только 35% его используется для горения кокса. Механический надом этих фракций составляет примерно 92% от полного значения q_4 .

9. Дальнейшее повышение КПД котла "Рето" CV-25-18 за счет снижения потерь тепла от механической неполноты сгорания можно получить при улучшении условий выгорания кокса фракций с начальным диаметром больше $\sigma_3^a = 0,46 \times 10^{-3}$ м, прежде всего за счет

увеличении времени пребывания этих частиц и возврата их в зоны с первоначальной концентрацией кислорода. В этом случае потери тепла от механического недожога будут снижены до 0,2-0,3%. Необходимо применить многократную циркуляцию частиц боксита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ структуры топливно-энергетического комплекса Республики Куба показал, что в настоящее время на основе багассо - отходов сахарного тростника - удовлетворяется примерно 30% энергетических потребностей Республики, остальные потребности за счет дорогого привозимого из-за границы жидкого топлива - нефти. Рациональное использование багассо в качестве топлива, ежегодное количество которого составляет около 20×10^6 тонн, на основе создания котлов с высоким КПД может позволить сэкономить примерно 2×10^6 тонн багассо и, следовательно, уменьшить зависимость страны от импорта нефти.

Натуральное багассо имеет высокое содержание влаги ($W^P = 50 \pm 2\%$), летучих ($V^P = 42,5\%$) и низкое содержание золь ($A^P = 2 \pm 0,5\%$), причем эти характеристики достаточно стабильны на всех сахарных заводах Республики Куба. Отмечено увеличение содержания Na_2O и K_2O (до 12%) в золе багассо в конце апреля и начале мая, когда на Кубе наступает сезон дождей и количество посторонних веществ в тростнике, поступающем на сахарные заводы, увеличивается. Это уменьшает температурные характеристики золь T_1 до 1173 К и T_2 до 1470 К, что вызывает увеличение изнашивания поверхностей нагрева котлов.

2. Проведенные комплексные балансовые и внутритопочные испытания котла "Рето" CV -35-18 - современного типового котла сахарных заводов Республики Куба - позволили определить основные потери тепла и КПД котла brutto, который оказался чрезвычайно низким - около 74-76%, вследствие высоких значений потерь тепла с уходящими газами (14-15,5%) и механической и химической неполнотой горения топлива (4% + 4%). Повышенные потери тепла с

указаны газами низкими значениями температуры указных газов, на 17 К превышающими проектную величину.

3. Внутренние исследования котла "Рето" обнаружили значительную неравномерность полей температур и концентрации кислорода в горизонтальном сечении топки над решеткой, что и приводит к возрастанию суммарной потери тепла от механической и химической неполноты горения до 8%. Золотой баланс показал, что доля летучей воли, унесенной газами из топки, составляет около 0,82. Это указывает на то, что значительная часть багасов горит в топочном объеме над слоем. Ядро факела с температурой около 1370 К находится в нижней задней части топки.

4. Обработка опытных данных по замерам температур рабочих сред и газового потока в поверхностях нагрева котла Рето методом обратного баланса позволила определить температуру газов на выходе из топки (1187 К), которая оказалась на 44 К ниже проектной. Вследствие этого расчетный коэффициент тепловой эффективности экранов топки составил 0,305, что меньше нормативного на 33% и указывает на повышенное загрязнение экранов топки.

5. Проведены исследования аэродинамических характеристики одиночной частицы натурального багаса, определены скорости вращения и коэффициенты сопротивления частиц в характерном диапазоне диаметров от $1,6 \times 10^{-3}$ до 16×10^{-3} м; предложены обобщенные зависимости, которые позволяют определить эквивалентный диаметр шара, аэродинамически подобной частице багаса.

6. Исследования процесса термического разложения и горения натурального багаса на дериватографе в среде азота и смеси азота с кислородом позволили определить положение и величину тепловых пиков ДТ, характеризующих эти процессы, а также выявить, что с уменьшением концентрации кислорода наблюдается перемещение

линов ЛТГ в сторону более высоких температур из-за уменьшения выгорания топлива при горении летучих. Получено, что при концентрации кислорода — 10% наблюдается эндотермическая реакция до температуры 448 К, что связано с плавлением лигнина и разложением геопалинилози. Этот эндотермический эффект нарастает при дальнейшем уменьшении концентрации кислорода и имеет минимальное значение в чистом азоте.

7. Обработка опытных данных по методу Ланго показала возможность принять первый порядок реакции разложения и позволила получить значения кинетических параметров разложения в азоте

$$E = 60,14 \frac{\text{КДж}}{\text{моль}}, \quad K_0 = 0,0477 \times 10^4 \frac{1}{\text{с}} \text{ при } 393-660 \text{ К и}$$

$$E = 86,86 \frac{\text{КДж}}{\text{моль}}, \quad K_0 = 0,0578 \times 10^4 \frac{1}{\text{с}} \text{ при } 660-1033 \text{ К и}$$

$$\text{горения в воздухе } E = 79,8 \frac{\text{КДж}}{\text{моль}}, \quad K_0 = 17,74 \times 10^4 \frac{1}{\text{с}} \text{ при}$$

$$393-593 \text{ К и } E = 136,29 \frac{\text{КДж}}{\text{моль}}, \quad K_0 = 293 \times 10^4 \frac{1}{\text{с}} \text{ при } 593-770 \text{ К.}$$

Значения этих констант достаточно близки к значениям, полученным другими авторами для прессованных частиц багассы и древесины, что свидетельствует о достоверности наших результатов.

8. Стационарные исследования процесса горения частиц натурального багассы при условиях, характерных для топочных камер паровых котлов, сжигания багассы во взвешенном состоянии, в диапазоне температур 973-1273 К, скорости потока 1-3 м/с и концентрации кислорода 10-21% показали, что весь процесс горения может быть разделен на несколько последовательных стадий:

— стадию прогресса, сжигания и выхода летучих веществ до их воспламенения $(\tau_{в\lambda})$;

— стадию пламенного горения летучих веществ $(\Delta \tau_{\pi\lambda})$;

— стадию горения коксового остатка $(\Delta \tau_{\pi\kappa})$.

На продолжительность первой стадии $(\tau_{в\lambda})$ определяюще

влияние оказывают содержание влаги в багассе и температура газового потока. Продолжительность второй стадии ($\Delta \tau_{г\lambda}$) зависит, прежде всего, от диаметра частицы и в меньшей степени от температуры потока, т.е. приток топлива к частице происходит в основном от факела горючих летучих. Выявлена независимость продолжительности этой стадии от содержания влаги в частице, т.е. процесс сушки частицы натурального багассе в наших опытах заканчивался до воспламенения летучих. На продолжительность стадии горения коксового остатка ($\Delta \tau_{гк}$) наибольшее влияние оказывают диаметр частицы и концентрация кислорода. Обработка опытных данных позволила предложить эмпирическую зависимость для расчета продолжительности выгоревших стадий, которую можно использовать для оценки процесса горения частиц багассе в топочных камерах паровых котлов.

9. Предложена физико-математическая модель горения в топочном объеме частиц багассе, которая на основе диффузионно-кинетических представлений о процессе горения позволяет при ряде допущений рассчитать изменение размеров частиц неправильной формы, их температуру, отличную от температур потока газов. Расчеты продолжительности стадии горения коксового остатка по этой модели и по эмпирической зависимости, аппроксимирующей опытные данные, показали удовлетворительное совпадение результатов ($\pm 4,2\%$), что свидетельствует о применимости, предложенной модели.

10. Расчеты процесса горения частиц натурального багассе, выполненные в топочном объеме котла "Рото" с использованием экспериментальных данных температур и концентрации кислорода в топочной камере по предложенной модели показали, что потери тепла с

с механическим недогомом определяется неполным сгоранием фракции с начальным диаметром больше $\delta_2^a = 0,46 \times 10^{-3}$ м. Консковые частицы этих фракций горят при неблагоприятных условиях: концентрация кислорода меньше 8,5%, температура газов ниже 1350 К. Механический недогом этих фракций составляет примерно 92% от полного значения $q_{2.4}$ (4,13%). Полученные значения потерь тепла с механическим недогомом в расчетах и в опытах практически совпадают, что позволяет применить данную методику для расчета выгорания консковых частиц натурального багаса в объеме топки.

II. Учитывая высокую пористость частиц багаса, целесообразно для повышения экономичности котлов, сжигающих багас, отказаться от слоевого способа сжигания и перейти к фанельному способу с многократной циркуляцией частиц. Для этого можно использовать, например, топку ЛМ, хорошо зарекомендовавшую себя при сжигании широкой гаммы твердых топлив в Советском Союзе. Применение топки ЛМ для сжигания багаса должно повысить эффективность процесса горения и увеличить КПД котла на 4-6%, за счет снижения потерь тепла с химической и механической неполнотой горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Castro F. Discursos pronunciado en el Primer Forum Nacional de Energia. - La Habana: Editora Politica, 1984. - 91 p.
2. Informe Central al Tercer Congreso del Partido Comunista de Cuba. - La Habana: Editora Politica, 1986. - 134 p.
3. Informe Central Segundo Forum Nacional de Energia. - La Habana: 1987. - 41 p.
4. Domenech B.J. Panorama de la energia en Cuba // Energia. - 1985. - N 2. - P.2-12.
5. La Radiacion Solar: una solucion parcial a los problemas energeticos/ L.Berriz Perez, M.Alvarez Guerra, H.Alvarez Gonzales y otros // Energia. - 1985. N 9. - P.2-13.
6. Gonzalez E. La Paja de caña de azucar como fuente renovable de energia. - La Habana: Ed.Academia. - 1982. - 36 p.
7. Sasson A. La biotecnologia y el Tercer Mundo // El Correo. - 1987. N 3. - P.29-33.
8. Гално Р. Оптимизация структуры генерирующих мощностей электроэнергетической системы Республики Куба с использованием имитационного динамического моделирования. Автореферат дисс. на соиск.уч.степ.канд. экономических наук. - Ленинград, 1986. - 16 с.
9. Monografia sobre mini, micro y pequenas centrales hidroelectricas / Grupo de Hidroenergia de la Comision Nacional de Energia // Energia. - 1984. - N 1. - P.29-42.
10. Гонсалес Е. Состояние энергетики в Республике Куба// Энергетика. Топливо. Достижения и перспективы. - 1985.- Вып.40, Б 7. - С.115-119.

11. Patureau J.M. By products of the sugar industry. An introduction to their industrial utilisation // Sugar Series 3. - Amsterdam, 1982. - 366 p.
12. Srinivasan V.R., Pathak S.R. A century of utilisational and fundamental work on sugarcane bagasse // International Sugar Journal. - 1961. - N 7. - P.208-210.
13. Jowhariall B. The sugar industry as a major source of Energy // Bioenergy 84. Proceedings International Conference. Göteborg, 15-21 June 1984. - London, 1985. - Vol.4. - P.15-21.
14. Tillman D.A., Roel A.J., Kitto W.D. Wood combustion principles processes and economics. - San Francisco: Academic Press, 1981. - 207 p.
15. Estudio sobre la calidad del bagazo / M.Rodriguez, R.Gutierrez // ATAC. - 1978. - N 4. - P.16-20.
16. Correa J.L. Sistemas y equipos de demolido en la industria del bagazo de la caña de azucar. - La Habana: Editorial Cientifico Tecnica, 1982. - 77 p.
17. Hugot E. Handbook of cane sugar engineering. - New York: Elsevier Publishing Co., 1972. - 350 p.
18. Horst B. Bagasse steam generator. Experiences and trends // Mitteilungen aus den kraftwerkenanlagenbau der DDR. - 1983. - Vol.23. - N 1. - P.28-33.
19. Monig P. Principios de Tecnologia Azucarera. - La Habana: Ed. Pueblo y Educacion, 1979. - T.1. - 645 p.
20. Candy V.A., Happler D., Tausin C. Combustion of bagasse. Use of an agricultural derived waste // Fuel. - 1983. - Vol.62. - N 7. - P.775-780.
21. Роне Днас П.Р. Физико-химические превращения при пиролизе и горении багасы: Дисс. ... канд.техн.наук. - Киев, 1984. - 160 с.

22. Garay P.L. La remodelacion de la caldera alemana de 25 $\frac{5}{8}$ // Energia. - 1985. - N 5. - P.14-27.

23. Ikehara T. Explosive bagasse combustion // Rpts Meeting Hawaiian Sugar Tech. - 1974. - P.188-190.

24. Dixon T.F. Combustion characteristics of bagasse suspension boilers // Proceedings of Australian Society of sugar cane technologists. Macray Conference, - 1983. - Brisbane Q, 1983. - P.265-271.

25. Исследование путей повышения мощности, экономичности и надежности парогенераторов энергетических установок: Отчет о НИР / Ленингр. политехн. ин-т: Руководитель В.В. Померанцев. - Л., 1978. - 88 с.

26. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). - М.: Энергия, 1973. - 295 с.

27. Трембовля В.И., Сингер Е.Д., Андеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. - М.: Энергия, 1977. - 296 с.

28. Внуков А.К. Экспериментальные работы на парогенераторах. - М.: Энергия, 1971. - 294 с.

29. Бошник Л.Л. Измерения при теплотехнических исследованиях. - Л.: Машиностроение, 1974. - 446 с.

30. Акулиничев А.А., Беликов С.Д. Определение коэффициентов теплоотдачи и температуры газа методом двух термодатчиков // Теплоэнергетика. - 1971. - N 6. - С.67-69.

31. Кичиников А.А. К методу определения действительной температуры газового потока по показаниям двух термопар // Теплоэнергетика. - 1966. - N12. - С. 80-83.

32. Миронов В.А., Харченко М.Г. Автоматический газодинамический пирометр для измерения газов в точечных устройствах //

Теплоэнергетика. - 1973. - В 7. - С. 80-82.

33. Методы измерения температур в промышленности / А.Н.Гордов, А.С.Ариханов, В.Я.Гилик и др.; под ред. А.Н.Гордова. - М.: Металлургияиздат, 1952. - 432 с.

34. Кушин Т. Температура. - М.: Мир, 1965. - 447 с.

35. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. - М.: Энергия, 1973. - 702 с.

36. Гордов А.Н. Основы пиометрии. - М.: Металлургия, 1971. - 446 с.

37. Тольберг К.А., Вихерстауэ Н.С. Курс газовой хроматографии. - М.: Илимия, 1974. - 376 с.

38. Киселев А.В., Яшин Я.И. Газоадсорбционная хроматография. - М.: Наука, 1967. - 256 с.

39. Ногаро С.А., Джувет Р.С. Газовидностная хроматография. - М.: Недра, 1966. - 472 с.

40. Вексирев А.А., Чулунова А.Ф. Руководство по газовой хроматографии. - М.: Высшая школа, 1976. - 334 с.

41. Андреева А.А., Веткина Г.И. Показание пробы продуктов горения после определения кислорода на аппаратах БТИ и Орса // Теплоэнергетика. - 1964. - В 5. - С. 93-94.

42. Андреева А.А. Контроль сжигания газообразного топлива. - М.: Энергия, 1971. - 254 с.

43. Barroso Esteban T.A. Determinacion de algunos factores empiricos utilizados en el calculo termico del horno de las calderas que combustienon bagaso en suspension-capa. Tesis presentada en opcion al grado cientifico de Candidato a Doctor en Ciencias Tecnicas. - Santiago de Cuba, 1988. - 250 p.

44. Hariharan P.K., Thompson I.J. A new approach to efficiency calculations for bagasse-fired boilers // Combustion. - 1977. Vol.48, N 8. - P.14-16.

45. Сидельниковский Л.Н., Превоз В.Н. Парогенераторы промышленных предприятий. - М.: Энергия, 1978. - 336 с.
46. Ковалев А.П., Лелюев Н.С., Виленицкий Т.В. Парогенераторы. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 376 с.
47. Париков В.А., Ушаков С.Г. Мониторинг и наладка паровых котлов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 318 с.
48. Блок А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. - Л.: Энергия. - 1967. - 325 с.
49. Гуравич А.М. Теплообмен в топках паровых котлов. - М.: Госэнергоиздат. - 1950. - 175 с.
50. Резниченко М.И., Лылов В.М. Паровые котлы тепловых электростанций. - М.: Энергоиздат, - 1981. - 239 с.
51. Прасолов Р.С. Массо- и теплоперенос в топочных устройствах. - М.: Энергия, - 1964. - 236 с.
52. Бонсан Хусеин Н. Макромикротехника и оптимизация процессов сушки: Дисс. ... докт. техн. наук. - Сантьяго-де-Куба, 1986. - 220 с.
53. Pacheco Bertot P. Ecuaciones para el diseño de instalaciones a transporte neumático por tuberías verticales de materiales pulverulentos, granulados, polimorfos y polidispersos. Resumen de la tesis presentada en opción al grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas. - Santiago de Cuba, 1984. - 23 p.
54. Ponce H, Friedman P, Leal D. Geometric properties and density of bagasse particles // International Sugar Journal. - 1983. - Vol.85, N 1018. - P.291-295.
55. Recio A. Caracterización mediante técnicas de modelación del horno de la caldera Reto CV-25-18 para el quemado de bagazo en torbellino horizontal. Resumen de la tesis presentada en opción

al grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas. - Santiago de Cuba, 1988. - 38 p.

56. Rosa Alarcón G. Caracterización del proceso de clasificación neumática del bagazo bajo diferentes regímenes de operación. Resumen de la tesis presentada en opción al grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas, 1987. - 38 p.

57. Grobart P. Determinación de la velocidad de arrastre del bagazo // Control, cibernética y automatización. - 1973. - Vol.7, N 4. - P.3-6.

58. Ponce N. Resumen del trabajo presentado sobre la velocidad de arrastre de partículas de bagazo // Primera Conferencia Internacional sobre Alta Eficiencia en la Industria Azucarera, Mantenimiento y Explotación. - La Habana, 1968. - P.3-29.

59. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Амандов и др.; Под ред. В.В. Померанцева. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 309 с.

60. Неостанов С.М. Исследование выгорания частиц древесного топлива в топочном объеме слоевой топки: Дисс. ... канд. техн. наук. - Л., 1970. - 354 с.

61. Paulik T, Paulik P. Simultaneous thermanalytical examinations by means of the derivatograph. Part A. Wilson and Wilson Comprehensive Analytical Chemistry. Vol. XII. Thermal Analysis.

62. Уэнцмант У. Топливные методы анализа. - М.: Мир. - 1978. - 526 с.

63. Сильва Лора Э.Э. Обоснование возможности сжигания проосованных частиц bagazo в топках паровых котлов.: Дисс. ... канд. техн. наук. - Л., 1988. - 213 с.

64. Захаров В.В. Исследование кинетики термического разложения компонентов минеральной части твердого топлива: Дисс. ...

ВАНД.ТЕХН.НАУК. - Л., 1980. - 200 с.

65. Chang Li-Yang, Kaihan P. Kinetic of biomass pyrolysis processes with fast heating rate // Proc. of 17-th Miami Int. Conf. Alternatives Energy Sources. - Miami, 1986. - P.861-862.

66. Zeako J, Zeako J.Jr. Kinetic analysis of thermogravimetric data. XIV. Three integral methods and their computer programs// J. Thermal Analysis. - 1980. Vol.19, N 2. - P.335-345.

67. Rogers J.M, Susett R.A, Kelsey R.G. Chemical composition of forest fuel affecting their thermal behavior // Canadian Journal of Forest Research. - 1986. - Vol.16, N 4. - P.721-726.

68. Roberts A.F. The heat of reaction during the pyrolysis of wood // Combustion and Flame. - 1971. - Vol.17, N 1. - P.79-86.

69. Дербан Т.М., Запашник Л.М. Экспериментальное исследование термического разложения некоторых пород древесины // Изв. Академии наук СССР. Серия физико-энергетических наук. - 1982. - N 4. - С. II0-II2.

70. Roberts A.F. A review of kinetics data for the pyrolysis of wood and related substance // Combustion and Flame. - 1970. - Vol.14, N 2. - P.261-272.

71. Ramlah M.V. Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose and lignin // Journal of Applied polymer Science. - 1970. - Vol.14, N 5. - p.1323-1337.

72. Kosik H, Luzarova V, Releser V. Study on the thermal destruction of cellulose and its derivatives // Cellulose Chemistry and Technology. - 1972, N 6. - P.589-597.

73. Домбурт Т.Э, Паранова Т.Е. Исследование взаимодействия компонентов древесины в процессе ее термической обработки // Химия древесины. - 1979. - N 5. - С. 82-88.

74. Левин Э.Д., Пайхадцилова М.К. Экспериментальные исследования температурного эффекта пиролиза коры лиственной древесины ондровской // Химия древесины. - 1970. - № 5. - С. 139-142.
75. Fole D.L., Zoror C.A. The effect of alkalisalts on low temperature pyrolysis // Energy Biomass. Proc. Int. Conf. Biomass. Berlin (West) 26-28 sept. 1982. - New York, 1983. - P.16-21.
76. Chan W.C.B., Krieger B.B. Analysis of chemical and physical processes during devolatilization of a single, large particle of wood // Chemical reaction engineering. American Chemical Society symposium series. - 1982. - № 196. - P.459-471.
77. Механизм горения и термической деструкции багассы / В.Э. Шамет, П.Роме Диас, В.А. Лавренко, В.А.Христич // Химическая технология. - 1984. - № 6. - С. 32-35.
78. Некоторые особенности горения измельченной багассы в воздушном потоке /В.А.Христич, П.Роме Диас// Горение органического топлива (материал всесоюзной конференции, сентябрь, 1984) часть I. - Новосибирск. - 1985. - С. 266-310.
79. Определение кинетических характеристик процесса термического разложения багассы в инертной среде /Э.Сильва Л., С.М. Пестанов, П. Боатон С. и др. // Химия древесины. - 1986. - № 3. С. 103-106.
80. Shafizadeh F. Pyrolytic reactions and products of biomass conversion. International Conference (1982, Fostes Park, Cole). - London, 1985. - P.183-217.
81. Aho M., Routari J. The effect of atmosphere on pyrolysis of solid fuels produced in Finland // Fundamentals of thermochemical Biomass conversion. - London. Elsevier applied science Publishers, 1985. - P.429-435.
82. Проблемы разработки теории горения твердого топлива /В.В.Померанцев, С.М.Пестанов, А.Н. Дулукалов, Б.В.Ужик//

Горение органического топлива (материал V всесоюзной конференции, сентябрь, 1984). Часть I. - Новосибирск. - 1985. - С.22-32.

83. Хизалин А.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. - М.: Энергия, 1976. - 488 с.

84. Канторович Б.В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива. - М.: Металлургиздат, 1961. - 355 с.

85. Теория топочных процессов /Под ред. Г.Ф.Кнорре, И.И.Полоса. - Л.: Энергия, 1966. - 491 с.

86. Горение углерода /Под ред. А.С.Протодителова. - М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. - 407 с.

87. Яворский И.А. Вопросы теории горения ископаемых углей и интенсификации их воспламенения. - Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1961. - 206 с.

88. Timothy L.D., Sarofin A.F., Beer J.M. Characteristics of single particule coal combustion // Nineteenth Symposium (International) on Combustion. - Massachusetts, 1982. - P.1123-1130.

89. Essenhigh R., Howard J. Pyrolysis of coal particles in pulverized fuel flames // Ind.Eng.Chem. Process Design and Development. - 1967. - Vol. 6, N 1. - P.38-36.

90. Setirches S.V., Burganus V.N. Intra particle diffusion and char combustion // Chemical Engineering Science. - 1986. - Vol.41, N 6. - P.1599-1609.

91. Wayne W.S., Keneeth W.R. Burning rate of millimeter sized wood particles in a furnaces // Combustion Science and technology. - 1986. - Vol.46, N 1-2. - P.1-15.

92. Лисов В.К., Сосонский А.М., Шестаков С.М. Экспериментальная установка для исследования тепло- и массообмена при прогреве и горении частиц твердого топлива /Ленинград. политех. ин-т, -Л., 1981. - 14 с. - Деп. в ИНИОМАНЕРГО. 26. окт. 1981 г. В Д/989.

93. Egdard R.H. Effect of size, shape, density, moisture and furnace wall temperature on burning times of wood pieces // Fundamentals of thermochemical Biomass Conversion. International Conference (1982, Eassey Park, Cole). - London, 1985. - P.220-225.

94. Agarwal P.K. A single particle model for the evolution and combustion of coal volatiles // Fuel. - 1966. - Vol.65. - P.803-810

95. Tu C.M., Davis H., Hottel H.C. Combustion rate of carbon // Ind.Eng.Chem. - 1934. - Vol.26. - P.747-757.

96. Бродский В.З., Бродский Л.И. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей. Справочное издание. - Москва: Металлургия, 1982. - 751 с.

97. Shukla H.P. Efficient utilization of bagasse as fuels // Chemical age of India. - 1984. - Vol.34, N 3. - P.149-152.

98. Ефимов В.И., Иванова И.И. Изучение механики выгорания частиц газифицированного угля // Горение взрывного тонкого топлива. - Новосибирск, 1973. - С.140-149.

99. Oliva R.L., Silva L.E., Beaton S.P. Modelacion matematica de la combustion del bagazo // Energetica. - 1985. - Vol.6, N 3. - P.208-213.

100. Oliva R.L., Beaton S.P., Silva L.E. Analisis de la combustion del bagazo en la camara del horno // Energetica. - 1987. - Vol.8, N 3. - P.203-208.

101. Oliva R.L., Beaton S.P., Silva L.E. Determinacion de la velocidad de vuelo y el numero de Russell para particulas de bagazo en combustion // Energetica. - 1987. - Vol.8, N 1. - P.50-55.

Приложение I

Средние значения для различных условий работы

Обозначение	Единица измерения	Среднее значение	Условия работы			
			Среднее значение			
			1	2	3	4
$Q_{\text{ср}}$	кВт	7000,0	6000	6500	6800	6900
$L_{\text{ср}}$	г/с	1,3	1,21	1,25	1,28	1,31
D	мм	6,3000	6,3000	6,3000	6,3000	6,3000
$T_{\text{ср}}$	с	600	600,0	600,0	600	600
$T_{\text{нб}}$	с	300	300	300	300	300
$P_{\text{ср}}$	кВт	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$T_{\text{тс}}$	с	300	300,0	300,0	300,0	300,0
$U_{\text{ср}}$	В	600	600	600	600	600
$q_{\text{ср}}$	с	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$q_{\text{ср}}$	с	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$q_{\text{ср}}$	с	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$q_{\text{ср}}$	с	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$q_{\text{ср}}$	с	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Σq	с	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
$q_{\text{ср}}$	с	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$D_{\text{ср}}$	мм	6,3000	6,3000	6,3000	6,3000	6,3000
$Q_{\text{ср}}$	кВт	7000,0	6000	6500	6800	6900
$Q_{\text{ср}}$	кВт	1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$L_{\text{ср}}$	г/с	1,3	1,21	1,25	1,28	1,31

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I

Результаты расчета при обработке опытных данных

Обозначение	Размерность	Проектный расчет	Тепловой баланс			
			Номер опытов			
			1	2	3	4
Q_H^P	кВт	7554,9	8225	8122	8182	8241
L_T''		1,3	1,21	1,21	1,21	1,21
D	мм	6,9444	5,6068	5,1590	5,1123	4,7577
T_{nn}	К	593	648,6	565,1	633	583
T_{nb}	К	383	367	363	352	355
P_{nn}	МПа	1,8632	1,6180	1,7093	1,5455	1,2238
T_{TL}	К	293	309,5	310,5	311,5	309,5
v_{yx}	К	472	489	480	485	476
q_2	%	13,4	15,45	14,38	14,78	14,15
q_3	%	0,5	4,04	3,96	3,97	3,99
q_4	%	4,0	3,99	4,23	3,85	3,46
q_5	%	1,2	1,49	1,61	1,63	1,75
q_6	%	-	0,78	0,83	0,83	0,77
Σq	%	19,1	25,75	25,02	25,06	24,12
$\eta_{\text{кр}}$	%	80,9	74,25	74,98	74,94	75,88
B_p	кг/с	2,6986	2,4549	2,1105	2,2586	1,9858
$Q_{\text{ка}}$	кВт	$65,56 \times 10^6$	$56,60 \times 10^6$	$48,66 \times 10^6$	$52,23 \times 10^6$	$46,61 \times 10^6$
$Q_{\text{ка}}$	-	1	0,8633	0,7423	0,7567	0,7109
$Q_{\text{каном}}$	-	1,54	1,468	1,47	1,471	1,469

Т о п к а

Обозначение	Размерность	Проектный расчет	Номера опытов			
			1	2	3	4
t_{rB}	K	492	444	439	443	427
Q_{Boz}	$\frac{KJ}{m^2}$	682,44	552,65	525,6	551,15	500,15
Q_T	-	8649,9	8418,8	8298,86	8382,3	8390
ψ_T''	K	1143	1187	1127	1173	1114
ψ_a	K	1635	1635	1637	1631	1632
K_r	$\frac{I}{m^2}$	0,64	0,58	0,7	0,565	0,65
$K_{ком}$	-	1	1	1	1	1
$K_{3л}$	-	6,8	6,8	7	6,7	7
x_1, x_2	-	0,5; 0,03	0,5; 0,03	0,5; 0,03	0,5; 0,03	0,5; 0,03
K	$\frac{I}{m^2}$	0,266	0,248	0,297	0,241	0,247
K_{ps}	-	0,755	0,704	0,844	0,686	0,702
Q_{ϕ}	-	0,532	0,506	0,55	0,495	0,505
ψ_{cp}	-	0,458	0,287	0,320	0,280	0,336
Q_T	-	0,745	0,81	0,818	0,807	0,78
M	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Q_n^T	$\frac{KJ}{m^2}$	3416,4	2977,5	3309,12	3030	3407
q_n	$\frac{KJ}{m^2}$	$68,15 \times 10^3$	$54,22 \times 10^3$	$51,8 \times 10^3$	$50,76 \times 10^3$	$50,14 \times 10^3$
q_v	$\frac{KJ}{m^3}$	$153,52 \times 10^3$	$145,14 \times 10^3$	$123,16 \times 10^3$	$132,81 \times 10^3$	$118,4 \times 10^3$
q_R	$\frac{KJ}{m^2}$	$134,9 \times 10^4$	$126,97 \times 10^4$	$107,82 \times 10^4$	$116,23 \times 10^4$	$103,62 \times 10^4$

О с т о н

Обозначение	Размерность	Проектный расчет	Номер опытов			
			1	2	3	4
H	m^2	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8
ν'	K	1135	1187	1127,6	1173	1114
γ'	$\frac{KJX}{KT}$	5183	5360,5	4915,3	5283,7	4902,7
ν''	K	1061	1099	1039	1078,5	1026
γ''	$\frac{KJX}{KT}$	4693,4	4807,3	4350	4674,3	4342
$Q\delta$	$\frac{KJX}{KT}$	482,3	561,8	552,6	537	547,84
t_{kun}	K	457	479	477,66	476,4	467,8
ΔT	K	884	937	878,6	922,4	875,2
W_r	$\frac{m}{c}$	4,6	4,2	3,35	3,6	3,17
L_K	$\frac{Dz}{m^2 K}$	43,38	40,32	36,68	37,22	36,18
L_n	$\frac{Dz}{m^2 K}$	41,17	43,47	40,28	45,18	36,63
ξ	-	I	I	I	I	I
L_1	$\frac{Dz}{m^2 K}$	84,55	83,79	76,97	82,17	72,81
ψ	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
K	$\frac{Dz}{m^2 K}$	50,7	50,23	46,17	49,44	43,68

Газовая камера

Обозначение	Размерность	Проектный расчет	Номер опытов			
			1	2	3	4
H	m^2	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
V'	K	1061	1099	1099	1073,6	1026
T'	$\frac{K}{m^2}$	4693,4	4807,3	4350	4674,8	4342
Q_n	$\frac{K}{m^2}$	29,3	37,68	35,58	35,58	30,14
T''	$\frac{K}{m^2}$	4664	4768,7	4316,6	4638,5	4311,3
V''	K	1056	1093	1033	1073	1021,6
ε	-	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
L_n	$\frac{K}{m^2}$	38,15	41	36,05	37,21	27,9
ΔT	K	766	797	756,2	790,2	768,6

47

2

734

744,3

756,2

795,7

712,5

Второй (по паре) ступень пароперегревателя

Обозначение	Размерность	Проектный расчет	Номер опытов			
			1	2	3	4
$H_{пор}$	m^2	44,2	29,61	29,61	29,61	29,61
$H_{пр}$	m^2	17,1	11,45	11,45	11,45	11,45
ϑ'	K	1056	1093	1033	1073	1021,6
γ'	$\frac{K \cdot m}{m^2}$	4664	4763,7	4316,6	4633,5	4273,6
t'	K	556	571	498	557,6	510,6
i'	$\frac{K \cdot m}{m^2}$	3372,5	3027	2850,6	2999,8	2903,5
i_{nn}	"	2073,1	3198,7	3018	3169,1	3066,3
$Q\delta$	"	473,5	354,6	367,2	345,8	351,7
γ''	"	4157,5	4396,5	3920,6	4264	3936,5
ϑ''	K	969	1021,8	960,2	1003	951,8
K	$\frac{K \cdot m}{m^2 \cdot K}$	45,58	47,23	40,35	43,48	39
ΔT	K	734	721,2	736,4	715,7	712,5

Первая (по паре) ступень пароперегревателя

Обозначение	Размерность	Практический расчет	Номер опытов			
			1	2	3	4
$H_{\text{пол}}$	м^2	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8
ν'	к	969	1021,8	960,2	1009	951,85
γ'	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	4157,15	4386,5	3920,6	4264	3936,51
$t_{\text{нп}}$	к	487	479	477,6	476,4	467
$i_{\text{нп}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	2798	2794,7	2794	2791,5	2787,57
$i_{\text{по}}$	"	2977,2	3032,49	2992,7	3013,15	2988,5
$t_{\text{по}}$	к	553	573,2	553	563	546
$Q_{\text{с}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	462,22	543,02	485,67	506,6	481,5
γ''	"	3671,8	3915,6	3409,7	3734,4	2504,87
ν''	к	894	932	876,6	918	871,3
к	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{к}}$	33,72	32,95	28,85	29,142	26,83
ΔT	к	683	721,13	673	713	675

Первая часть поперечного пучка

Обозначение	Размерность	Прокладный расчет	Номер опытов			
			1	2	3	4
H	m^2	258	258	258	258	258
ϑ'	K	894	932,6	876,6	918	871,28
γ'	$\frac{K \cdot K}{m^2}$	3671,8	3315,6	3409,7	3731,4	3429,8
ϑ''	K	708	713	683,2	702,84	403,45
γ''	$\frac{K \cdot K}{m^2}$	2574,98	2540,55	2167,5	2478,4	2315,3
$Q\delta$	"	1083,96	1255	1071,84	1232,43	1088,56
ΔT	K	578	605,15	564,6	596,65	570,4
W_r	$\frac{m}{c}$	5,8	5,23	4,24	4,7	3,96
α_K	$\frac{B_r}{m^2 \cdot K}$	50,7	47,54	40,94	44,77	38,93
ϵ	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
α_c	$\frac{B_r}{m^2 \cdot K}$	61,75	59,73	50,38	56,38	48,03
ψ	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
K	$\frac{B_r}{m^2 \cdot K}$	37,09	35,86	30,24	33,73	28,72

Вторая часть котельного пучка

Обозначение	Размерность	Процентный расчет	Номер опытов			
			1	2	3	4
H	м ²	168,6	168,6	168,6	168,6	168,6
v'	к	708	713	683	702,84	676,45
γ'	$\frac{кг}{м^2}$	2574,8	2540,55	2318,6	2478,37	2315,3
v''	к	631	628	606	621	598,7
γ''	$\frac{кг}{м^2}$	2152	2082	1916,7	2083,76	1899,96
Q _с	"	419,94	453,93	397,75	433,12	410,31
ΔT	к	453	461,53	437	455,6	440,6
W _г	$\frac{м}{с}$	6,3	5,64	4,6	5	4,2
L _к	$\frac{кг}{м^2 \cdot к}$	54,89	50,79	38,03	46,24	36
f	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
L _г	$\frac{кг}{м^2 \cdot к}$	62,1	58,7	50,73	53,16	48,33
ψ	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
K	$\frac{кг}{м^2 \cdot к}$	37,22	34,84	30,53	31,88	29,04

Третья часть котельного пучка

Обозначение	Размерность	Проектный расчет	Номер опытов			
			1	2	3	4
H	м ²	182,7	182,7	182,7	182,7	182,7
v'	K	631	628	606	621	598,7
γ'	$\frac{K \cdot H}{H^2}$	2152	2082	1916,7	2038,76	1899,97
v''	K	579	571	555	565	546
γ''	$\frac{K \cdot H}{H^2}$	1867,3	1779,64	1652,1	1745,68	1626,15
Qδ	"	283,86	300,9	263,76	289,63	272,14
ΔT	K	389	391,35	373,9	387,8	376,2
W _r	$\frac{M}{C}$	6,2	5,46	4,48	4,97	4,13
α _K	$\frac{D_2}{m \cdot K}$	54,31	50,38	43,75	46,4	41,68
f	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
L _i	$\frac{D_2}{m \cdot K}$	60,24	56,21	50,04	52,66	47,54
ψ	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
K	$\frac{D_2}{m \cdot K}$	36,16	33,73	30,02	31,59	28,52

Расчет трубчатого воздухоподогревателя

Обозначение	Размерности	Процентный расчет	Номер сечения			
			1	2	3	4
H	м ²	924	924	924	924	924
z'	к	579	571	555	565,7	546
γ'	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	1867,3	1779,6	1652,1	1745,6	1626,10
t _{xв}	к	298	300,76	306,4	303,77	302,68
T _{xв}	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	73,27	85,54	100,23	94,75	91,4
t _{гв}	к	492	444	439	443	427
T _{гв}	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	647,7	529	500	527	477
Q _г	"	648,95	466	418	454	403,1
T _{yx}	"	1230,9	1325,5	1245	1302,5	1235
v _{yx}	к	472	489	490	485	476
W _r	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	9,9	8,92	7,46	8,17	6,94
L ₁	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{к}}$	40	32,49	28,76	30	25,92
W ₆₀₃	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	4,6	4,11	3,43	3,76	3,25
L ₂	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{к}}$	56,63	44,62	39,39	40,41	34,125
f	-	0,65	0,373	0,342	0,365	0,35
K	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{к}}$	15,23	7,077	5,85	6,29	5,16
ΔT	к	396,5	426	416	425	417

Приложение 2

Экспериментальные результаты скорости вращения частиц натурального бабаса

№	Размер частицы	ρ кг/м ³	$W_{\text{вот}}^{\text{опы}}$ м/сек	S_{ch}	K_i	$\delta a \text{ эр}$	$\delta F/v$
	мм	кг/м ³	м/сек	-	-	мм	мм
1	2	3	4	5	6	7	8
1	50x6, 1x0, 8	427,17	0,756	1,753	9,3601	0,3595	2,0839
2	22x5, 8x3	78,36	0,7403	3,0421	14,4002	0,9314	5,4426
3	22,5x4, 3x1, 7	182,39	0,8095	2,4999	12,2802	0,6271	3,4672
4	21x6, 1x1, 8	136,17	0,7518	2,5642	12,5302	0,7059	3,9108
5	29x3, 6x1, 5	191,57	0,7245	2,2035	11,1102	0,5581	3,0646
6	37,5x4, 1x2, 2	151,36	0,8693	2,8621	13,7302	0,7465	4,1373
7	36,5x3, 4x1, 4	202,02	0,6953	2,0782	10,6101	0,5254	2,8963
8	26x3, 1x1	307,69	0,7518	1,9509	10,1101	0,4333	2,2042
9	28,5x3, 6x1	320,66	0,69	1,7660	9,8301	0,3970	2,2851
10	28,5x2, 7x0, 86	480,03	0,7941	1,7682	9,8301	0,3450	1,9130
11	20x2, 9x1, 84	222,07	0,7891	2,2340	11,4202	0,5460	3,1972
12	26x2, 9x1, 1	254,4	0,6953	1,9243	10,0101	0,4572	2,3213
13	27x2, 8x1, 2	318,56	0,7482	1,9192	9,9901	0,4232	2,444

1	2	3	4	5	6	7	8
14	24x3,1x1,3	130,93	0,69	2,1392	10,8502	0,5556	2,6467
15	29x2,6x1,9	191,26	0,7949	2,4142	11,9602	0,6012	3,1732
16	21x2,5x2,2	148,91	0,7130	2,3599	11,7202	0,6107	3,5053
17	29x2,1x0,96	283,44	0,6556	1,7487	9,3201	0,4106	1,9310
18	50x2,9x1,7	217,03	0,8186	2,3877	11,8302	0,5699	3,1043
19	25x3x1,4	167,61	0,6591	2,0965	10,6901	0,5611	2,7533
20	41x2x1,4	343,43	0,894	2,0255	11,1902	0,4601	2,4219
21	20x2,8x1	217,85	0,6377	1,5577	9,7501	0,4691	3,132
22	17,5x3x1	245,71	0,6670	1,8663	9,7901	0,4520	2,1576
23	25,5x2,16x0,83	411,79	0,8073	1,9016	9,9201	0,5357	1,7619
24	28x1,6x1,5	296,29	0,7611	2,0002	10,3101	0,4475	2,3347
25	28x2,1x1,03	373,15	0,7504	1,8257	9,6201	0,5366	2,0232
26	22x3,2x1	261,24	0,7353	1,9664	10,1701	0,4492	2,2032
27	25x2,26x1,23	230,23	0,7097	2,0295	10,4201	0,4922	2,3157
28	45x1,83x1,53	377,79	0,8674	2,1016	10,7001	0,4232	2,4543
29	25x1,93x1,03	376,27	0,7694	1,9123	9,9601	0,5391	1,9621
30	37x2,66x1,23	223,036	0,7673	2,1394	11,0502	0,5275	2,4672
31	33x2,53x0,96	405,48	0,8940	2,1155	10,7802	0,4205	2,0447

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6	7	8
32	20x1,6x1,23	408,19	0,8257	1,9495	10,1101	0,3943	2,0390
33	22x2,26x1,3	231,57	0,7834	2,0942	10,6901	0,4716	2,3363
34	20x2,66x0,8	350,09	0,6003	1,4920	9,1500	0,3346	1,79
35	20x1,7x0,83	435,86	0,6627	1,5907	8,4201	0,3212	1,6277
36	25x2,8x1,03	299,53	0,6721	1,7543	9,3601	0,4043	2,1933
37	17x2,9x0,9	317,73	0,7003	1,7931	9,5201	0,4037	1,9305
38	23x2,2x0,9	331,57	0,7353	1,8610	9,7601	0,403	1,8644
39	34x2,7x1,6	240,33	0,8463	2,3364	11,8302	0,5503	2,9274
40	25x2,2x0,9	335,35	0,802	1,9235	10,0301	0,3996	1,8634
41	18x1,6x1,2	460,06	0,8863	2,0117	10,3501	0,3973	1,9316
42	22x2,4x1,03	329,14	0,8076	2,0496	10,5001	0,44	2,0935
43	21x2,6x1,2	341,89	0,7726	1,9855	10,0501	0,4153	2,3705
44	25x1,7x0,9	324,18	0,6323	1,7412	9,2901	0,3913	1,7243
45	24x1,8x1	451,36	0,7460	1,7031	9,1401	0,3446	1,8733
46	20x2,1x0,9	272,43	0,5320	1,4379	7,73	0,3473	1,8323
47	21x2,3x0,7	511,63	0,7011	1,5349	8,4501	0,3055	1,5699
48	15x1,7x0,8	416,66	0,6939	1,6224	8,8201	0,3416	1,5749

Продолжение приложения 2

I	2	3	4	5	6	7	8
49	18x1,4x0,6	661,37	0,6372	1,3809	7,43	0,2466	1,2313
50	26x0,9x0,4	865,38	0,5672	1,0419	5,69	0,1726	0,8220
51	15x1,6x0,6	749,99	0,6379	1,3255	7,1	0,226	1,2721
52	16x1x0,6	947,91	0,7324	1,3051	6,98	0,2054	1,0992
53	17x1,9x0,7	535,16	0,6922	1,4929	8,15	0,2908	1,4899
54	25x1x0,5	912	0,5947	1,0735	5,83	0,1738	0,9869
55	30x1,73x0,73	504,13	0,7051	1,5513	8,5401	0,3104	1,5142
56	21x1,26x0,7	475,11	0,6211	1,3939	7,51	0,2784	1,3217
57	17x1,6x0,96	332,96	0,6089	1,4686	7,9909	0,3189	1,7386
58	16x2,06x0,6	606,79	0,6448	1,3335	7,1500	0,2442	1,3546
59	22x0,9x0,7	591,63	0,6396	1,3344	7,15	0,2463	1,1604
60	18x1,6x0,6	573,70	0,6642	1,3955	7,52	0,2609	1,2781
61	18x1,5x0,6	512,34	0,6426	1,4062	7,58	0,2739	1,2558
62	17x1,9x1	433,43	0,7410	1,7147	9,1901	0,3508	1,8926
63	14x1,4x0,6	608,74	0,6706	1,3892	7,43	0,2559	1,2739
64	15x2,16x0,6	358,8	0,6986	1,6808	9,0501	0,3596	1,6857

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6	7	8
65	18x1, 1x0,7	541,125	0,5596	1,2003	6,4300	0,2282	1,2535
66	12x1, 5x0,5	722,22	0,5364	1,0466	5,71	0,1340	1,0909
67	15x1, 7x0,46	605,23	0,4782	0,9893	5,47	0,137	1,0635
68	14x1, 5x0,8	482,14	0,6524	1,4593	7,91	0,2917	1,5089
69	18x1, 6x1	489,58	0,7312	1,7357	9,2701	0,3402	1,7351
70	19x1, 1x0,56	649,35	0,3952	1,2034	6,45	0,2154	1,0919
71	13x2, 1x0,6	349,94	0,6110	1,3066	6,99	0,2469	1,3876
72	21x1, 1x0,6	591,63	0,5715	1,1919	6,3900	0,0301	1,1436
73	16x1, 3x0,6	512,82	0,4368	1,0649	5,79	0,2092	1,2007
74	18x1, 5x0,95	465,14	0,7460	1,6971	9,1201	0,3427	1,6903
75	18x1, 6x0,5	549,61	0,5220	1,1165	6,030	0,2130	1,1192
76	18x1, 6x1	549,61	0,5220	1,1165	6,030	0,2130	1,1192
77	18x1, 6x1	549,61	0,5220	1,1165	6,030	0,2130	1,1192
78	18x1, 6x1	549,61	0,5220	1,1165	6,030	0,2130	1,1192
79	18x1, 6x1	549,61	0,5220	1,1165	6,030	0,2130	1,1192
80	18x1, 6x1	549,61	0,5220	1,1165	6,030	0,2130	1,1192
81	18x1, 6x1	549,61	0,5220	1,1165	6,030	0,2130	1,1192
82	18x1, 6x1	549,61	0,5220	1,1165	6,030	0,2130	1,1192
83	18x1, 6x1	549,61	0,5220	1,1165	6,030	0,2130	1,1192
84	18x1, 6x1	549,61	0,5220	1,1165	6,030	0,2130	1,1192

Приложение 3

Результаты расчета скорости вращения по эмпирическому диаметру шара.

№	Размер частицы	$W_{\text{бул}}^{\text{онд}}$ м/сек	$\delta_3^a = 0,193 \delta F / \nu$ мм	$K: (\delta_3^a)$ "	$S_{ch}(\delta_3^a)$ "	δ_3^a $W_{\text{бул}}$ м/сек	$\frac{W_{\text{бул}}^{\text{онд}}}{W_{\text{бул}}^a}$
I	2	3	4	5	6	7	8
1	30x6, 1x0,8	0,7500	0,4022	10,4973	2,0471	0,8916	0,8573
2	22x5, 8x3	0,7403	1,0504	15,5142	3,2379	0,8037	0,9211
3	22,5x4, 3x1,7	0,8035	0,6691	13,1333	2,7123	0,8736	0,9202
4	21x6, 1x1,3	0,7513	0,7549	13,4312	2,7370	0,8133	0,9137
5	29x3, 6x1,5	0,7245	0,5915	11,3034	2,3736	0,7332	0,9250
6	37,5x4, 1x2,2	0,8635	0,7335	14,7223	3,1055	0,9443	0,9203
7	36,5x3, 4x1,4	0,6953	0,5590	11,3553	2,2651	0,7592	0,9164
8	26x3, 1x1	0,7513	0,4254	9,9490	1,9070	0,7361	1,0213
9	28,5x3, 6x1	0,6900	0,4410	10,4572	2,0369	0,7370	0,9357
10	28,5x2, 7x0,86	0,7941	0,3692	10,0747	1,9359	0,8733	0,9093
11	20x2, 9x1,34	0,7391	0,6170	12,9374	2,6633	0,9216	0,8562
12	26x2, 9x1,1	0,6353	0,4430	9,3313	1,3775	0,6733	0,9235
13	27x2, 8x1,2	0,7432	0,4716	11,1533	2,2151	0,8643	0,8651

Пропозиции приложения 3

1	2	3	4	5	6	7	8
14	24x3,1x1,3	0,6900	0,5109	9,9996	1,9204	0,6303	1,1123
15	29x2,6x1,9	0,7949	0,6124	12,2140	2,4822	0,8169	0,9730
16	21x2,5x2,2	0,7130	0,6417	11,7670	2,3694	0,7169	0,9945
17	28x2,1x0,96	0,6556	0,5727	8,4802	1,5343	0,5761	1,1379
18	30x2,9x1,7	0,8196	0,5991	12,4659	2,5456	0,8740	0,9966
19	25x3x1,4	0,6591	0,5323	11,0759	2,1942	0,6608	0,9541
20	41x2x1,4	0,8940	0,4674	11,9953	2,2753	0,8153	0,9767
21	20x2,8x1	0,6377	0,4115	8,5732	1,5579	0,5355	1,1908
22	17,5x3x1	0,6670	0,4164	9,0321	1,6742	0,5992	0,9983
23	25,5x2,1x0,83	0,8078	0,3400	8,7656	1,6066	0,6335	1,1518
24	28x1,8x1,5	0,7611	0,4602	10,6277	2,0803	0,7927	0,9601
25	28x2,1x1,03	0,7504	0,5904	9,7989	1,8540	0,7631	0,9833
26	22x3,2x1	0,7553	0,4264	9,6769	1,8382	0,6983	1,0682
27	25x2,26x1,23	0,7097	0,4469	9,4947	1,7983	0,6366	1,1226
28	45x1,83x1,53	0,8674	0,4737	11,8653	2,3944	0,9996	0,9765
29	25x1,93x1,03	0,7894	0,3787	9,4733	1,7864	0,7373	1,0693
30	37x2,66x1,23	0,7575	0,4761	9,9975	1,9199	0,6652	1,1537

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6	7	8
31	33x2,53x0,96	0,8940	0,8946	10,1209	1,9513	0,8256	1,0825
32	50x1,6x1,23	0,8257	0,8935	10,1152	1,9498	0,8270	0,9994
33	22x2,26x1,3	0,7834	0,4605	10,4543	2,0363	0,7623	1,0270
34	20x2,66x0,8	0,6006	0,3455	8,4369	1,5236	0,6139	0,9773
35	20x1,7x0,83	0,6627	0,3141	8,2531	1,4772	0,6405	1,0346
36	25x2,8x1,03	0,6721	0,4232	9,8094	1,8720	0,7160	0,9396
37	17x2,9x0,9	0,7003	0,3822	9,0356	1,6752	0,6594	1,0725
38	23x2,2x0,9	0,7353	0,3598	8,6273	1,5713	0,6219	1,1323
39	34x2,7x1,6	0,8466	0,5049	12,1627	2,4693	0,8772	0,9651
40	25x2,2x0,9	0,8020	0,3606	9,0907	1,6906	0,7037	1,1396
41	18x1,6x1,2	0,8863	0,3824	10,2308	1,9792	0,6733	1,0148
42	22x2,4x1,03	0,8073	0,4040	9,6639	1,8349	0,7242	1,1154
43	21x2,6x1,2	0,7726	0,4575	11,0835	2,1962	0,6779	0,8900
44	25x1,7x0,9	0,6823	0,3329	7,9223	1,4566	0,5720	1,1937
45	24x1,8x1	0,7460	0,3625	9,6369	1,6230	0,6013	0,9904
46	20x2,1x0,9	0,5320	0,3536	7,9409	1,4590	0,5406	0,9840
47	21x2,3x0,7	0,7011	0,3030	8,3997	1,5142	0,6926	1,0122

I	2	3	4	5	6	7	8
48	15x1,7x0,8	0,6829	0,3039	7,8558	1,4480	0,6184	1,1204
49	18x1,4x0,6	0,6372	0,2376	7,1761	1,3367	0,6665	1,0333
50	26x0,9x0,4	0,5672	0,1586	5,2399	0,9335	0,5039	1,1145
51	15x1,6x0,6	0,6579	0,2455	7,7527	1,4276	0,7420	0,9270
52	16x1x0,6	0,7324	0,3121	7,2239	1,3449	0,7558	0,9690
53	17x1,9x0,7	0,6922	0,2876	8,0904	1,4363	0,6669	1,0679
54	25x1x0,5	0,5947	0,190	6,4017	1,1927	0,6617	0,8987
55	30x1,7x0,73	0,7051	0,2922	8,0002	1,4287	0,6503	1,0842
56	21x1,2x0,7	0,6211	0,2550	6,8961	1,2371	0,5744	1,0813
57	17x1,6x0,96	0,6089	0,3355	8,4422	1,5249	0,6331	0,9617
58	16x2,06x0,6	0,6443	0,2614	7,6211	1,4181	0,6967	0,9383
59	22x0,9x0,7	0,6398	0,2239	6,5153	1,2152	0,5855	1,0964
60	18x1,6x0,6	0,6642	0,2467	7,1260	1,3280	0,6990	1,0492
61	18x1,5x0,6	0,6426	0,2424	6,7227	1,2550	0,5743	1,1189
62	17x1,9x1	0,7410	0,3651	9,7006	1,8443	0,7981	0,9284
63	14x1,4x0,6	0,6706	0,2457	7,1983	1,3405	0,6480	1,0348
64	15x2,16x0,8	0,6906	0,3253	8,0091	1,4158	0,5899	1,1854

Продолжение приложения 3

I	2	3	4	5	6	7	8
65	10x1, 1x0, 7	0,5536	0,2419	6,8324	1,2755	0,5944	0,9397
66	12x1, 5x0, 5	0,5364	0,2105	6,5473	1,2214	0,6269	0,8556
67	15x1, 7x0, 46	0,4782	0,2046	5,9998	1,1088	0,5365	0,8913
68	14x1, 5x0, 8	0,6524	0,2912	7,9138	1,4552	0,6525	0,9998
69	18x1, 6x1	0,7812	0,3445	9,4104	1,7704	0,7379	0,9790
70	19x1, 1x0, 56	0,5952	0,2107	6,3248	1,1771	0,5831	1,0207
71	12x2, 1x0, 6	0,6110	0,2600	7,3730	1,8709	0,6420	0,9517
72	21x1, 1x0, 6	0,5715	0,2207	6,4223	1,1968	0,5746	0,9946
73	10x1, 3x0, 6	0,4868	0,2317	6,4220	1,1979	0,5484	0,8876
74	18x1, 5x0, 95	0,7460	0,3262	8,7023	1,5906	0,7002	1,0654
75	18x1, 6x0, 5	0,5220	0,2100	6,1290	1,1365	0,5321	0,9810

Приложение 4

Характеристики частицы, термограмма которой
представлена на рис. 4.2.

Наименование	Обозначение	Размерность	Величина
Линейные размеры частицы	A		$4,4 \cdot 10^{-2}$
	B	м	$5,35 \cdot 10^{-3}$
	C		$4,7 \cdot 10^{-3}$
Плотность частицы	ρ	кг/м ³	347,99
Содержание влаги	W^p	%	56
Эквивалентные диаметры	$\delta_F/V = \frac{2BC}{B+C}$	м	$5 \cdot 10^{-3}$
	δ_3^a		$1,37 \cdot 10^{-3}$
Объем частицы	V	м ³	$1106,4 \cdot 10^{-9}$
Начальная масса частицы	m_0	кг	$385,02 \cdot 10^{-6}$

Результаты расчета параметров частоты багаса в котле "Рото" CV -25-18

		$\delta_3^a = 0,638 \cdot 10^{-3}, \text{м}$				$\delta_3^a = 0,46 \cdot 10^{-3}, \text{м}$			$\delta_3^a = 0,31 \cdot 10^{-3}, \text{м}$		$\delta_3^a = 0,18 \cdot 10^{-3}, \text{м}$	
		$\frac{h_r}{H_r}$				$\frac{h_r}{H_r}$			$\frac{h_r}{H_r}$		$\frac{h_r}{H_r}$	
		0,34	0,49	0,66	0,83	0,612	0,66	0,83	0,71	0,83	0,59	0,66
$\bar{T}_r$	K	1290	1201	1163	1141,5	1201	1163	1141,5	1163	1141,5	1201	1163
K_i	-	2,745	2,70	2,67	2,54	2,003	2,006	1,81	1,41	1,15	0,8095	0,6914
Sch	-	0,3073	0,2982	0,2913	0,265	0,1658	0,1657	0,136	0,082	0,055	0,0273	0,0199
ω_{bur}	$\frac{M}{C}$	0,2183	0,20	0,1894	0,1700	0,1143	0,1111	0,0897	0,0661	0,037	0,0195	0,0138
Re	-	0,8448	0,8065	0,7806	0,676	0,3313	0,3310	0,246	0,1154	0,0634	0,022	0,1376
N_{ud}	-	2,1429	2,1366	2,1356	2,1232	2,077	2,076	2,062	2,037	2,025	2,012	2,009
T_z	K	1574	1396	1326	1269	1513	1391	1337	1474	1439	1637	1575
D	$\frac{M^2}{C}$	$2,71 \cdot 10^{-4}$	$2,23 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-4}$	$2,465 \cdot 10^{-4}$	$2,22 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$2,53 \cdot 10^{-4}$	$2,35 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
α_D	$\frac{M}{C}$	0,844	0,762	0,73	0,743	1,113	1,051	1,03	1,66	1,47	3,35	3,349
K_1	"	10,22	4,92	3,5	2,87	8,13	4,81	3,7	6,93	5,97	23,24	10,26
K_2	"	8,14	3,64	2,5	2,01	6,33	3,55	2,66	5,30	4,5	20,03	8,17
K_3	"	0,663	0,133	0,063	0,0407	0,40	0,126	0,07	0,282	0,203	4,03	0,67
K_3'	"	2,6	0,803	0,468	0,3425	1,8	0,7738	0,512	1,39	1,10	9,66	2,62
K_4'	$\frac{1}{C}$	$1,11 \cdot 10^{10}$	$3,17 \cdot 10^9$	$1,76 \cdot 10^9$	$1,25 \cdot 10^9$	$7,52 \cdot 10^9$	$3,046 \cdot 10^9$	$1,94 \cdot 10^9$	$5,7 \cdot 10^9$	$4,41 \cdot 10^9$	$4,57 \cdot 10^9$	$1,12 \cdot 10^9$
N_1	-	12,10	6,457	4,8	3,86	7,3	4,57	3,42	4,17	4,06	6,93	3,06
N_2	-	9,64	4,73	3,42	2,70	5,60	3,37	2,46	3,19	3,06	5,99	2,44
N_3	-	0,73	0,1745	0,0863	0,055	0,36	0,1198	0,065	0,17	0,133	1,2	0,200
N_3'	-	3,08	1,06	0,6411	0,461	1,6172	0,74	0,474	0,8373	0,7433	2,89	0,73
$N_1 + N_2$	-	21,74	11,24	8,22	6,56	12,99	7,94	5,88	7,36	7,12	12,92	5,5
Se	-	2053	1115	837	673	1223,3	732	591	723	677	350	153
$0,5N_3P_{1\Delta}$	МПа	0,04312	0,01484	0,006975	0,006454	0,02264	0,01036	0,0066	0,01172	0,010217	0,01046	0,01092
$\bar{P}_{1\Delta}$	МПа	0,0081	0,00623	0,006014	0,0042	0,00323	0,005014	0,0042	0,005014	0,0042	0,00623	0,005016

		$\delta_3^a = 0,698 \times 10^{-3}, \text{м}$				$\delta_3^a = 0,46 \times 10^{-3}, \text{м}$			$\delta_3^a = 0,31 \times 10^{-3}, \text{м}$		$\delta_3^a = 0,18 \times 10^{-3}, \text{м}$	
		$\frac{h_T}{H_T}$				$\frac{h_T}{H_T}$			$\frac{h_T}{H_T}$		$\frac{h_T}{H_T}$	
		0,34	0,49	0,66	0,83	0,612	0,66	0,83	0,71	0,83	0,59	0,66
$W_T - W_{\text{вн}}$	$\frac{M}{C}$	1,98	2,00	2,01	2,03	2,035	2,038	2,11	2,14	2,16	2,18	2,186
$\Delta T \frac{\Delta S}{W_T - W_{\text{вн}}}$	C	0,60	0,63	0,63	1,6	0,16	0,65	1,5	0,44	1,46	0,242	0,622
G_c	$\frac{K_{\text{мол}}}{M^2 \cdot C}$	$0,64 \times 10^{-3}$	$0,46 \times 10^{-3}$	$0,65 \times 10^{-3}$	$0,51 \times 10^{-3}$	$0,7 \times 10^{-3}$	$1,052 \times 10^{-3}$	$0,73 \times 10^{-3}$	$1,855 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$2,11 \times 10^{-3}$	$3,73 \times 10^{-3}$
$\Delta \delta$	M	$0,22 \times 10^{-3}$	$0,184 \times 10^{-3}$	$0,25 \times 10^{-3}$	$0,4642 \times 10^{-3}$	$0,057 \times 10^{-3}$	$0,35 \times 10^{-3}$	$0,6 \times 10^{-3}$	$0,395 \times 10^{-3}$	$1,06 \times 10^{-3}$	$0,24 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$
$\delta_{\text{ш}} - \Delta \delta$	M	$6,56 \times 10^{-3}$	$6,37 \times 10^{-3}$	$6,12 \times 10^{-3}$	$5,6 \times 10^{-3}$	$4,7 \times 10^{-3}$	$4,35 \times 10^{-3}$	$3,75 \times 10^{-3}$	$2,97 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$1,96 \times 10^{-3}$	$0,86 \times 10^{-3}$
$ABC = \frac{\Pi \delta_{\text{ш}}^3}{6}$	M^3	$14,7 \times 10^{-8}$	$13,5 \times 10^{-8}$	12×10^{-8}	$9,1 \times 10^{-8}$	$5,4 \times 10^{-8}$	$4,3 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-8}$	$1,37 \times 10^{-8}$	$0,35 \times 10^{-8}$	$0,39 \times 10^{-8}$	$0,033 \times 10^{-8}$
$\frac{B}{C}$	-	$6,50 \times 10^{-6}$	6×10^{-6}	$5,3 \times 10^{-6}$	4×10^{-6}	3×10^{-6}	$2,4 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$0,92 \times 10^{-6}$	$0,23 \times 10^{-6}$	$0,3 \times 10^{-6}$	$0,25 \times 10^{-6}$
B	M	$3,72 \times 10^{-3}$	$3,59 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,42 \times 10^{-3}$	$2,16 \times 10^{-3}$	$1,71 \times 10^{-3}$	$1,27 \times 10^{-3}$	$0,63 \times 10^{-3}$	$0,69 \times 10^{-3}$	$0,068 \times 10^{-3}$
C	M	$1,73 \times 10^{-3}$	$1,67 \times 10^{-3}$	$1,54 \times 10^{-3}$	$1,35 \times 10^{-3}$	$1,23 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$0,87 \times 10^{-3}$	$0,71 \times 10^{-3}$	$0,35 \times 10^{-3}$	$0,43 \times 10^{-3}$	$0,039 \times 10^{-3}$
δ_3^a	M	$0,64 \times 10^{-3}$	$0,62 \times 10^{-3}$	$0,58 \times 10^{-3}$	$0,5 \times 10^{-3}$	$0,45 \times 10^{-3}$	$0,4 \times 10^{-3}$	$0,32 \times 10^{-3}$	$0,25 \times 10^{-3}$	$0,12 \times 10^{-3}$	$0,15 \times 10^{-3}$	$0,013 \times 10^{-3}$