

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической
технологии, нефтехимии и биотехнологии

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Разработка технологических решений переработки мазута во
вторичное сырье»

Студент

М.В. Арефьев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.б.н., доцент Е.П. Загорская

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Аннотация

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка технологических решений переработки мазута во вторичное сырье».

Работу выполнил студент группы ЭРТбз-1501Д Арефьев М.В.

Год защиты – 2020 г.

Работа состоит из 5 разделов, содержания, введения, заключения и списка используемых источников.

Руководитель выпускной квалификационной работы – Загорская Е.П.

В данной работе предложена модификация трубчатой печи для получения вторичных продуктов из мазута. Изучена технология процесса переработки мазута на установке ВТ-2 и основные типы трубчатых печей. Произведены расчеты печи и выбрана оптимальная модель для данного процесса. По полученным результатам для повышения эффективности работы аппарата предложена замена участка оребренных труб в камере конвекции на ошипованные.

Содержание

Введение.....	4
1 Технология производства получения вторичного сырья из мазута.....	6
2 Типы и основные характеристики трубчатых печей.....	10
2.1 Двухскатные (шатровые) двухкамерные печи.....	13
2.2 Двухкамерные печи с беспламенными панельными горелками.....	14
2.3 Трубчатые печи с двухрядными центральными экранами радиации.....	15
2.4 Многокамерные трубчатые печи типа Р.....	16
2.5 Узкокамерные печи с верхним отводом дымовых газов типа Г.....	17
2.6 Цилиндрические печи.....	19
3 Типы горелочных устройств в печах.....	22
4 Технологический расчет печи.....	25
4.1 Расчет процесса горения топлива.....	25
4.2 Тепловой баланс трубчатой печи.....	32
4.3 Выбор типа трубчатой печи.....	37
4.4 Расчет камеры радиации.....	39
4.5 Расчет диаметра печных труб.....	44
4.6 Расчет камеры конвекции.....	45
4.6.1 Участок пучка с гладкими трубами.....	45
4.6.2 Участок пучка с оребренными трубами.....	49
4.6.3 Участок с ошипованными трубами.....	50
5 Характеристика технологии энерго- и ресурсосбережения процесса получения вторичного сырья из мазута.....	54
5.1 Продукты, получаемые при переработки мазута.....	57
Заключение.....	62
Список используемых источников.....	64

Введение

«Рациональное использование нефти – невозполнимого источника энергии и сырья для производства множества нефтехимических продуктов, смазочных масел, битума, кокса и др. – является важнейшей государственной задачей» [1].

«Показателем уровня развития нефтеперерабатывающей промышленности, принятым в нашей стране еще в 50-60-е годы и широко используемым нефтепереработчиками России, является глубина переработки нефти, представляющая собой процент выхода всех нефтепродуктов на нефть, за вычетом выхода топочного мазута и величины безвозвратных потерь» [1].

«На НПЗ России глубина переработки нефти не превышает 68-70%, против 80-95% в развитых странах Запада» [1].

«Повысить глубину переработки возможно за счет более полного извлечения топливных фракций из нефти при ее первичной перегонке, подбора наиболее благоприятного состава топливных продуктов (бензин, реактивное топливо, дизельное топливо), а самое главное, за счет развития деструктивных процессов переработки нефтяных остатков с получением ценных топливных и нефтехимических продуктов» [1].

«В зависимости от типа нефти из остатка атмосферной перегонки (мазута) выделяют масляные дистилляты, которые направляются затем на маслблок или вакуумный газойль, являющийся сырьем каталитического крекинга» [2].

«Для снижения температур кипения разделяемых компонентов и предотвращения термического разложения сырья мазут перегоняют в вакууме» [2].

Первичные нефтеперерабатывающие установки являются наиболее важной частью любого нефтеперерабатывающего завода [3].

На предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» с 01.10.2016г. установка вакуумной трубчатки для перегонки мазута (ВТ-2) входит в состав комплекса технологических установок первичной переработки сернистой нефти (АВТ-1, АВТ-2 и ВТ-2) в производстве моторных топлив.

Особым значением на ВТ-2 обладает трубчатая печь, которая осуществляет нагрев мазута перед вакуумной колонной за счет сгорания топливного газа.

Пути модернизации трубчатых печей весьма разнообразны. Это может быть замена горелочных устройств на более современные с целью уменьшения расхода энергоресурсов, или полная перестройка печи на более современную конструкцию (на большинстве заводов в России до сих пор работают шатровые печи, построенные в 1930-1970 гг.)

Цель работы: модернизация печи нагрева мазута установки ВТ-2 для переработки мазута во вторичные продукты.

Основные задачи:

1. Проанализировать технологию производства получения вторичного сырья из мазута;
2. Рассмотреть основные виды трубчатых печей, их конструкцию и принцип работы;
3. Подобрать печь, удовлетворяющую исходным данным и произвести ее технологический расчет;
4. Предложить модернизацию печи для улучшения эффективности процесса нагрева мазута с целью получения вторичных продуктов.

1 Технология производства получения вторичного сырья из мазута

«Установки первичной переработки нефти составляют основу всех нефтеперерабатывающих предприятий» [4].

«Под фракционированием (дистилляцией или перегонкой) понимают разделение многокомпонентных жидких смесей на фракции (дистилляты) более простого состава путем частичного испарения смеси и конденсации образующихся паров» [5].

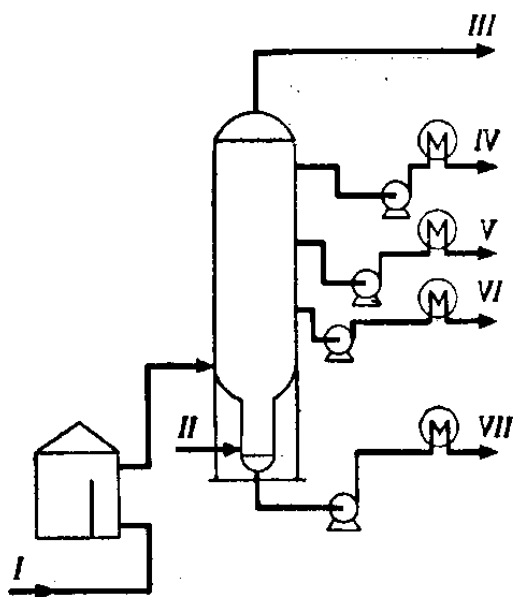
«Фракция, выкипающая при температуре выше 350°C, называется мазутом (остаток после отбора светлых дистиллятов)» [5].

В настоящее время основная задача современных установок вакуумной трубчатки (ВТ) – улучшение выхода фракций от их возможного значения и дальнейшая эффективная переработка кубовых остатков. Так, например, с мазутом теряется до 5 % дизельных фракций, а с гудроном – до 10 % масляных фракций [6].

На рисунке 1 представлена принципиальная схема установки вакуумной трубчатки. В нижней части ректификационной колонны происходит откачка мазутной фракции с помощью насоса. Далее сырье поступает в зону верхнего и нижнего экранов печи и переходит в колонну. Температура фракции мазута не превышает 410°C.

Снизу колонны поступает горячий водяной пар, а сверху - острый водяной пар. Все это происходит в вакуумной среде. Абсолютное давление в потолочной части колонны достигает 5,3 – 8,0 кПа (40-60 мм.рт.ст.). Вакуумная среда достигается за счет действия поверхностных конденсаторов и эжектором, обладающим тремя ступенями.

Легкие летучие газы выходят через верхнюю часть колонны и собираются в емкости. Пары, которые не превратились в конденсат, поступают в эжектор, далее смесь паров и газов попадает в промежуточный конденсатор. В трубное пространство поверхностных конденсаторов и подается обратная вода.



1– мазут; 2– водяной пар; 3 – несконденсированные газы и пары; 4 – легкий вакуумный газойль; 5 – тяжелый вакуумный газойль; 6 – затемненный продукт; 7 – гудрон

Рисунок 1 – Технологическая схема установки вакуумной трубчатки

В емкости остается продукт перегонки – дизельное топливо, которое под действием работы насосов попадает на узел выхода нефтепродуктов с установки.

В результате разгона в вакуумной колонне мазутной фракции образуются четыре дистиллята, которые подразделяются по температурам кипения:

1. 280-420°С – первый вакуумный погон;
2. 380-420°С – второй вакуумный погон (средняя вязкость);
3. 370-450°С – третий вакуумный погон (вязкий),
4. более 430°С – четвертый вакуумный погон (высокая вязкость),

в остатке остается гудрон.

Для получения более качественных дистиллятов внутри колонны имеется несколько пакетов структурной насадки. Насос откачивает из насадочного пакета, находящегося в верхней части колонны, дизельную фракцию. Она попадает в межтрубное пространство теплообменников, далее

охлаждается с помощью воздуха и делится на несколько потоков. Один из них используется для орошения после фильтрации потолочного колонного пакета, второй вместе с дизельной фракцией покидает установку.

Первый вакуумный погон под действием насоса попадает из второго пакета насадки в теплообменник и подвергается охлаждению, затем часть жидкости выводится из установки, а часть идет на орошение верхней части следующего пакета.

Далее из третьего пакета колоночной насадки вакуумный погон средней вязкости проходит аналогичный путь. Остальные вакуумные погоны также проходят через соответствующие пакеты, теплообменники и холодильники, и далее некоторым количеством орошают последующий пакет, а остальное выводится с установки.

В самом низу колонны остается гудрон, который с помощью насосов попадает в теплообменник, после которого некоторое его количество попадает обратно в кубовую часть колонны. Остальной гудрон выводится двумя способами: по «горячей схеме» на битумное производство и установку деасфальтизации, или по «холодной схеме» в парк товарно-сырьевого производства.

Исходное сырье установки и его отличительные характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходное сырье установки ВТ-2

Исходное сырье	Свойства:
1. Фракция мазута	- Выкипаемость до 360 °С не более 8% об. - Температура вспышки в открытом тигле не ниже 110 °С - рН водной вытяжки не более 8,5
2. Фракция атмосферного газойля с установок	- Отсутствие воды

Получаемые продукты с установки и их отличительные свойства представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные продукты установки ВТ-2

Основные продукты	Отличительная характеристика:
1. Фракция вакуумного дизельного топлива	- Температура выкипания 96% не выше 340 °С - Температура вспышки в закрытом тигле не ниже 60 °С
2. Компонент вакуумного газойля	- Температура конца кипения (98%): не выше 546 °С
3. Первый вакуумный погон	- Температура вспышки в закрытом тигле не ниже 180 °С - Температура начала кипения не ниже 320 °С
4. Второй (средневязкий) вакуумный погон	- Кинематическая вязкость при 100 °С: 5,6-5,9 мм ² /с (сСт) - Температура вспышки в открытом тигле не ниже 210 °С - Цвет на колориметре ЦНТ-не более 2,0 ед.ЦНТ
5. Третий (вязкий) вакуумный погон	- Кинематическая вязкость при 100 °С: 9,4-9,7 мм ² /с (сСт) - Температура вспышки в открытом тигле не ниже 230 °С - Цвет на колориметре ЦНТ-не более 3,0 ед.ЦНТ
6. Четвертый (высоковязкий) вакуумный погон	- Кинематическая вязкость при 100 °С не ниже 14 мм ² /с (сСт) - Температура вспышки в открытом тигле не ниже 255 °С - Цвет на колориметре ЦНТ-не более 6,0 ед.ЦНТ
7. Фракция вакуумного гудрона	- Выкипаемость до 500°С не более 10% [7].

Таким образом, трубчатые печи являются первой и основной ступенью в сложном процессе переработки мазута во вторичное сырье. Рассмотрим их виды и особенности конструкции.

2 Типы и основные характеристики трубчатых печей

«Трубчатые печи различного назначения имеют важнейшее значение на предприятиях нефтепереработки и нефтехимии» [8].

В настоящее время существует большое количество различных типов печей, поэтому их достаточно сложно классифицировать.

Печи, применяемые в отрасли нефтепереработки и нефтехимии обычно группируют по типу производства, технологическому применению, методу сжигания топлива или передачи теплоты, особенности конструкции.

«Одна из самых больших групп в классификации печей определяется по геометрии змеевика.

Различают змеевики:

- с вертикальным расположением труб;
- с горизонтальным расположением труб;
- спиральные змеевики;
- с арочным расположением труб» [8].

«Для повышения эффективности теплообмена сырье в змеевик подают в «противоток» с движением теплового потока (дымовых газов) печи» [8].

«Следующая применяемая классификация – по геометрии печи:

- цилиндрические печи (эта компоновка обеспечивает наибольшую равномерность нагрева змеевика при одностороннем обогреве и наименьшую материалоемкость каркаса-кожуха печи). Сегодня эта компоновка наиболее распространена. Ограничения по применению этой компоновки связаны, в первую очередь, с мощностью печи (как правило максимально до 15 Гкал/час), и при нагреве вязких, тяжелых фракций в процессе замедленного коксования;

- овальные печи (эта компоновка совмещает преимущества цилиндрической печи по равномерности нагрева и практически неограниченные тепловые мощности печи), достаточно редко используемая сегодня компоновка;

- коробчатые печи» [8].

«По количеству камер различают:

- однокамерные;
- многокамерные» [8].

Значимым элементом в работе печи является метод организации теплообмена.

«По типу горелок, форме факела различают печи с:

- факельными горелками;
- узкофакельными горелками;
- настильными горелками подовой установки;
- настильными горелками, установленными на стенах;
- инжекционными (с естественной тягой) горелками;
- дутьевыми (с принудительным наддувом) горелками» [8].

На сегодняшний день трубные печи изготавливают согласно каталогу «Трубчатые печи. Типы, параметры и основные размеры» [9].

Принято использовать следующие обозначения, представленные в таблице 3 и 4.

В конце обозначения часто можно встретить дробь, числитель которой указывает на площадь поверхности нагрева труб радиации, а знаменатель на длину или высоту топки.

Узнать количество рядов экрана можно по числовому индексу, который находится у первого буквенного обозначения модели печи. Единичный экран индексом не обозначается.

Если горелки располагаются ближе к выходу продукта, то у второй буквы ставят соответствующий знак в виде штриха.

Количество камер радиации или секций печи можно узнать по числовому индексу у второй буквы.

В таблице 5 представлена краткая характеристика трубчатых печей на установке ВТ-2 ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез».

Таблица 3 – Обозначения первой буквы

Первая буква	Тип печи	Особенность конструкции
А	Узкокамерная	Отвод дымовых газов находится сверху, экран расположен в центре горизонтально
В	Узкокамерная секционная	Трубы змеевика расположены вертикально
Г	Узкокамерная	Отвод дымовых газов находится сверху, трубы змеевика в горизонтальном положении
С	Секционная	Прямоугольно- и горизонтально- витый трубный змеевик
Ц	Цилиндрическая	Камера конвекции сверху. Конвективные и радиационные трубы расположены перпендикулярно друг к другу
К	Цилиндрическая	Камера конвекции имеет кольцевое строение. Трубы конвекции расположены вертикально

Таблица 4 – Обозначение второй буквы

Вторая буква	Способ сжигания топлива
С	Вертикальный свободный факел. Воздух идет по его высоте.
Н	Настильный факел
Д	Подвод воздуха дифференциальный по высоте факела
Б	Горение без пламени, Панельные горелки образуют излучающие стены

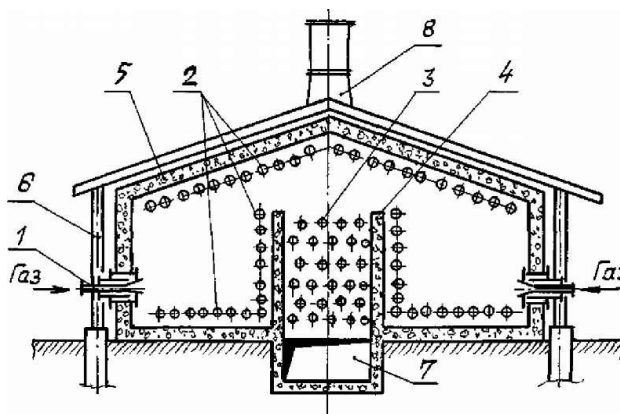
Таблица 5 – Краткая характеристика трубчатых печей на установке ВТ-2 ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез»

Характеристика	Трубчатая печь №1	Трубчатая печь №2
Материал	X5M	X5M
Температура, °С	370	410
Давление, МПа	2,5	2,0
Длина, мм	12100	12100
Количество труб, шт	84	60
Диаметр трубы, мм	152x8	102x6
Форсунки ГМГС-1,6, шт	14	-
Форсунки ГКВД-1,6, шт	14	28

Рассмотрим наиболее распространенные типы трубчатых печей более подробно: их конструкцию, преимущества и недостатки.

2.1 Двухскатные (шатровые) двухкамерные печи

Данный тип печи имеет три камеры: две радиационные и камеру конвекции. Схема печи приведена на рисунке 2.



1 – горелки; 2 – трубы радиации; 3 – трубы конвекции; 4 – перевальная стена; 5 – обмуровка; 6 – корпус печи; 7 – дымоход; 8 – выходная труба

Рисунок 2 – Двухскатная двухкамерная (шатровая) печь

Трубы радианных змеевиков 2 в данной конструкции обладают несколькими экранами одностороннего облучения: фронтальный, напольный и потолочный. Факел расположен горизонтально в камере радиации печи. Благодаря этому теплота излучения используется в более полном объеме.

Данный тип печей нашел широкое применение в нефтеперерабатывающем производстве благодаря их легкому обслуживанию и ремонту.

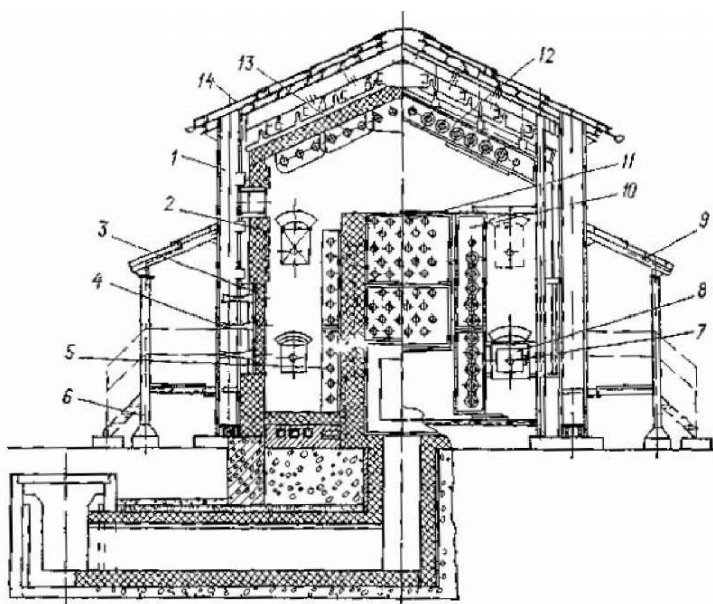
Низкие теплотехнические параметры и большие габариты являются основными минусами данных устройств.

Односторонний нагрев трубчатого змеевика, возможные прогары труб, невысокий КПД (60-70%) – все это заставляет задуматься о переходе на печи с беспламенными горелками [8].

2.2 Двухкамерные печи с беспламенными панельными горелками

На рисунке 3 изображена типовая схема двухкамерной печи с беспламенными панельными горелками. Данный тип печей в отличие от предыдущего обладает более узкой конструкцией.

Газовые горелки с беспламенным горением 4 находятся на боковых стенах устройства.



1 – металлический каркас; 2 – огнеупорная футеровка; 3 – кладка из керамических призм беспламенных горелок; 4 – панельные горелки; 5, 13 – трубы фронтального и потолочного экранов; 6 – обслуживающие площадки; 7 – смотровое окно; 8 – взрывное окно-лаз; 9 – навес; 10, 12 – ретурбентные камеры; 11 – трубы камеры конвекции; 14 – кровля

Рисунок 3 – Двухкамерная трубчатая печь с беспламенными горелками

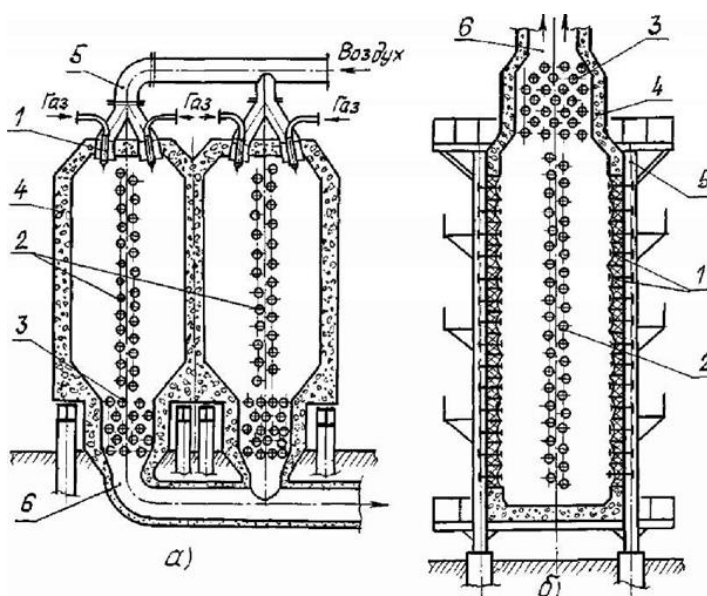
Всестороннее облучение труб позволяет добиться высокого КПД и хороших тепловых характеристик. Обслуживающие площадки снабжены

окнами-лазами со смотровым окном 7, через которое можно следить за состоянием горелок и труб радиации.

В камерах 10 и 12 находятся ретурбенды. Такое их размещение вдали от топки обусловлено не только более удобным обслуживанием, но и защитой от высоких температур развальцовочного соединения. Данная конструкция позволяет без больших затрат заменить печные трубы при их поломке через соответствующие окна в ретурбендных камерах.

2.3 Трубчатые печи с двухрядными центральными экранами радиации

Схема трубчатых печей с двухрядными центральными экранами радиации изображена на рисунке 4.



- а) двухкамерная с нижним отводом дымовых газов: 1 – факельные горелки; 2 – центральный экран радиации; 3 – змеевик конвнкции; 4 – обмуровка; 5 – воздуховод; 6 – дымоход;
- б) вертикальная печь с верхним отводом дымовых газов: 1 – инъекционные беспламенные горелки со сферической излучающей чашей; 2 – центральный экран радиации; 3 – змеевик конвнкции; 4 – обмуровка; 5 – корпус; 6 – газоход

Рисунок 4 – Печи с центральными двухрядными экранами

Экран находится в центре конструкции. Равномерное двустороннее облучение позволяет приблизить коэффициент облученности труб радиации к 1.

На рисунке 4а трубы центрального экрана получают облучение с двух сторон от газовых горелок 1, которые находятся сверху и обладают свободным нисходящим факелом. Отраженное от нагретых боковых стенок печи излучение создает дополнительную подачу тепла к трубам центрального экрана. Выход газов после камеры радиации и конвекции осуществляется через дымоход.

На рисунке 4б для облучения применяют инжекционные газовые горелки беспламенного горения. По всей высоте боковых стенок топки находится сферическая чаша излучения 1. Благодаря данной конструкции появилась возможность контролирования расхода газа, подводимого к горелкам, а следовательно и поддержание нужного режима температур по высоте экрана радиации. Горячие газы после змеевика конвекции 3 попадают в газосборник 6 и выводятся через дымоход.

2.4 Многокамерные трубчатые печи типа Р

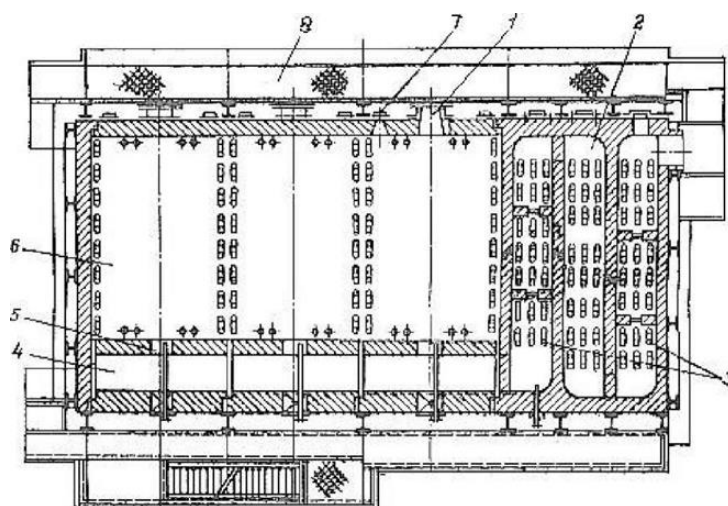
На таких производствах как гидроочистка и каталитический крекинг часто применяют многокамерные трубчатые печи типа Р, конструкция которых представлена на рисунке 5.

Они позволяют получить высокие температуры при нагреве смеси газа и сырья. Аппарат состоит из трех радиационных камер.

Трубчатые змеевики располагаются вертикально.

Экраны радиации расположены сбоку, облучение их происходит с двух сторон.

Основной особенностью конструкции данных печей является наличие не только комбинированных горелок, но и ребренной либо шипованной поверхности труб змеевика.



1 – горелка; 2 – конвекционная камера; 3 – змеевик конвекции; 4 – канал топочных газов; 5 – окно для отвода продуктов сгорания топлива; 6 – камера радиации; 7 – смотровое окно; 8 – металлический каркас

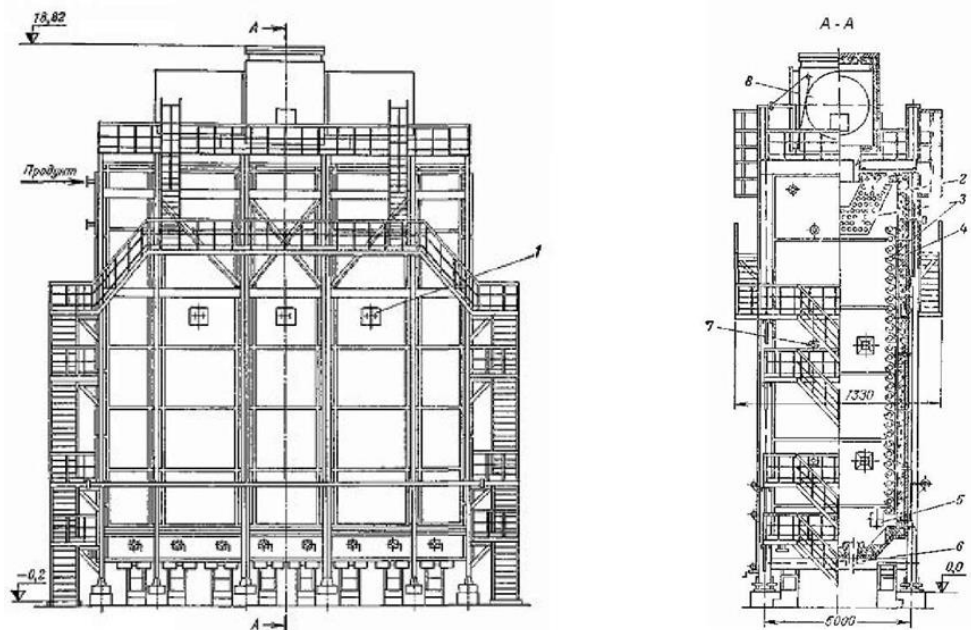
Рисунок 5 – Многокамерная трубчатая печь типа Р

Таким образом создается дополнительная турбулентность потока и повышение показателей теплоотдачи. Печь изготовлена из металла и огнеупорного материала (кирпича и перлитобетона).

2.5 Узкокамерные печи с верхним отводом дымовых газов типа Г

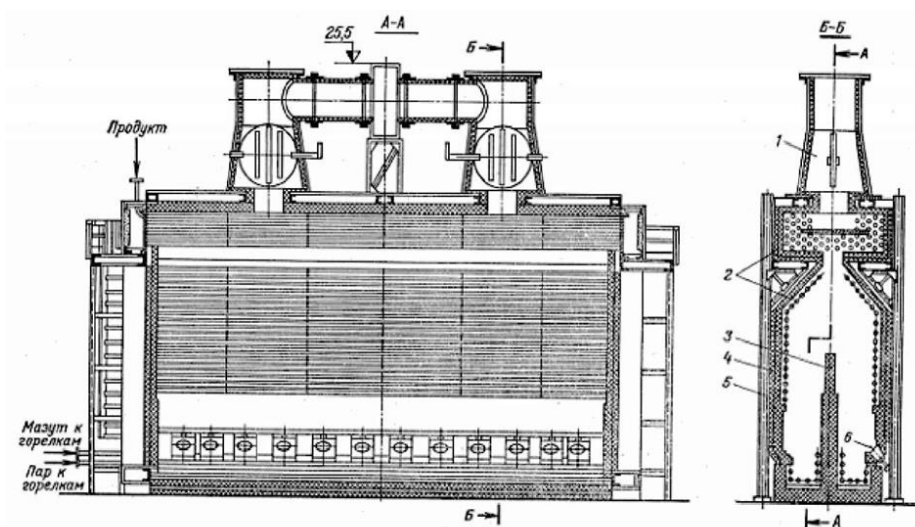
Установки атмосферно-вакуумной трубчатки обладают высокой производительностью. В их работе используются мощные узкокамерные печи с верхним отводом дымовых газов - ГС и ГН. Их схемы представлены на рисунках 6 и 7 соответственно.

При горении топлива в печах со свободным факелом горения облучение происходит за счет образования стены вертикальных факелов. Змеевики и радиации, и конвекции в данном типе печей установлены горизонтально. Корпус печи металлический. Также в конструкции применяются такие материалы как огнеупорный керамзитобетон и шамотной кирпич.



1 – смотровое окно; 2 – футеровка; 3 – змеевики радиации и конвекции; 4 – металлический корпус; 5 – люк-лаз; 6 – вертикальные горелки; 7 – выхлопные предохранительные окна

Рисунок 6 – Узкокамерная горизонтальная печь со свободным факелом горения типа ГС



1 – дымоход; 2 – змеевики радиации и конвекции; 3 – центральная настильная стена; 4 – обмуровка; 5 – металлический каркас; 6 – амбразура горелки

Рисунок 7 – Узкокамерная горизонтальная печь с настильным факелом горения типа ГН

В узкокамерных печах с настильным пламенем используют комбинированные горелки. Они, в отличие от горелочных устройств предыдущей модели, располагаются под углом 45° с обеих боковых сторон печи. Облучение экрана одностороннее. Тепло к экранам поступает от центральной стены печи.

Особенностью конструкции данного типа печи является наличие двух камер радиации, каждая со своим температурным режимом. Корпус печи также состоит из металла с элементами из жаростойкого бетона. Для обеспечения беспрепятственного доступа к оборудованию и наблюдению за его состоянием в конструкции печей предусмотрены специальные отверстия.

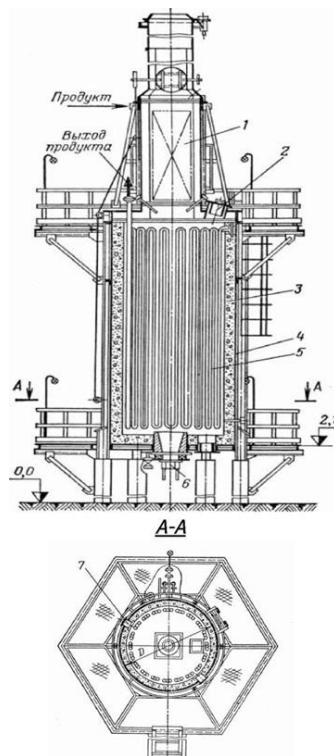
2.6 Цилиндрические печи

Печи цилиндрического типа имеют два вида: ЦС и ЦД. Их конструкции представлены на рисунках 8 и 9 соответственно.

Они обладают относительно маленькими габаритами. Горелки расположены в нижней части печи. Используют как жидкое, так и газообразное топливо. В печах типа ЦС применяют различные модели комбинированных горелок. Факел горения обладает достаточной высотой, а змеевик располагается вертикально. Основным материал печи – сварная сталь, также используются огнеупорные фрагменты из бетона и торкретбетона.

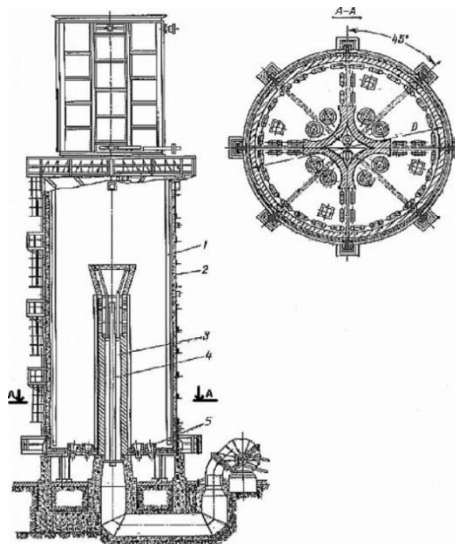
Облучение змеевика двустороннее. Тепло передается как от самого факела горения, так и от отражения от экрана. Для удобства обслуживания аппарата установлены специальные отверстия и площадки. Главным отличием от предыдущего аппарата является наличие пирамидального рассекателя-распределителя.

Его грани образуют области передачи тепла от горелочных устройств. Количество теплоты, расход воздуха и длина факела регулируются.



1 – камера конвекции; 2 – люк-лаз; 3 – футеровка; 4 – металлический каркас; 5 – радиантный змеевик; 6 – факельная горелка; 7 – смотровое окно.

Рисунок 8 – Цилиндрическая печь ЦС со свободным факелом горения



1 – радиантный змеевик; 2 – корпус; 3 – воздуховод от дутьевого вентилятора; 4 – рассекатель-распределитель; 5 – факельная горелка

Рисунок 9 – Цилиндрическая трубчатая печь типа ЦД с центральным рассекателем-распределителем

Таким образом, этот тип печей не только обеспечивает равномерное распространение тепловых потоков, но и увеличивает на 20 - 30% теплонапряженность поверхности труб и снижает риск отложения тяжелых остатков на их внутренней поверхности [8].

В таблице 6 представлены основные технические характеристики печей.

Таблица 6 – Основные технические характеристики печей

Тип печи	Теплопроизводительность, МВт	Средняя теплонапряженность радиантных труб, кВт/м ²
Шатровые двухкамерные печи	18	20-30
Многокамерная трубчатая печь типа Р	36	40
Узкокамерная горизонтальная печь со свободным факелом горения ГС	14,7 - 57,6	40,6
Узкокамерная горизонтальная печь с настильным факелом горения ГН	7,4 - 23,7	35
Цилиндрическая печь ЦС	3,9 - 17,2	35
Цилиндрическая трубчатая печь ЦД	22,0 - 36,5	40

Таким образом, самой низкой теплопроизводительностью обладают цилиндрические печи типа ЦС, а самой высокой – узкокамерные горизонтальные печи со свободным факелом горения. Наиболее высокие значения теплонапряженности радиантных труб также у узкокамерных горизонтальных печей со свободным факелом горения.

3 Типы горелочных устройств в печах

На нефтеперерабатывающих заводах России применяют более 1500 технологических трубчатых печей, в составе которых работают десятки тысяч горелочных устройств (ГУ), являющихся основными источниками загрязнения окружающей среды.

Поэтому, кроме полного и экологичного сжигания топлива (без химического недожога и с минимальным избытком воздуха и выбросом вредных веществ), важным критерием выбора горелочных устройств является необходимость обеспечения теплообмена в топочном пространстве. Благодаря этому будет обеспечен оптимальный температурный профиль по длине трубчатого змеевика с целью получения максимального выхода целевых продуктов в соответствии с технологическим регламентом [10].

«Конструктивные особенности горелок непосредственно влияют на схему подвода топлива и воздуха к агрегату, схему смешения компонентов, интенсивность горения топлива и состав продуктов горения, аэродинамическую структуру факела» [11].

«Конструкция горелки должна быть возможно более простой: без подвижных частей, без устройств, изменяющих сечение для прохода газа и воздуха и без деталей сложной формы, расположенных вблизи носика горелки» [11].

«Конструкция горелки для трубчатых печей должна отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать стабильное, равномерное распределение тепловой энергии по зонам печи и заданный температурный профиль по длине трубчатого змеевика;
- обеспечивать полное сжигания топлива заданного состава;
- горение должно быть устойчивым в широком диапазоне изменения расхода топлива (в идеале от 10 до 100% нагрузки), т.е. происходить без отрыва пламени от выходной части горелки или проскока его в смеситель;

- иметь большую теплопроизводительность, позволяющую размещать в топке ограниченное число горелок для упрощения обслуживания операторами;

- отличаться простотой изготовления, сборки, монтажа в печь и возможностью ремонта без останова печи;

- обеспечивать эффективный и экономичный расход топлива, работать с минимальным избытком воздуха;

- быть конструктивно несложной и удобной для технического обслуживания;

- обеспечивать безопасность эксплуатации и ремонта, а также сохранение чистоты окружающей среды, предотвращать загрязнение ее вредными выбросами с дымовыми газами;

- работать без значительного шумового давления (до 85 дБА) с соблюдением установленных санитарных норм;

- обладать возможностью включения в систему автоматического управления тепловым процессом печи;

- обеспечивать экологические показатели сжигания топлива» [8].

В современных печах горелки работают на двух видах топлива: жидком и газообразном [12].

«Горелочные устройства трубчатых печей играют важнейшую роль в печном агрегате технологического процесса и организации непосредственно процесса горения жидкого и газообразного топлива» [13].

«В качестве жидкого топлива для отопления топок и печей используют, как правило, мазут. Для транспортировки и его распыливания перед сжиганием вязкость мазута снижают путем подогрева до 90-150 °С» [11].

«Распыливание жидкого топлива осуществляют форсунками: паровыми и пневматическими высокого и низкого давления, механическими, паромеханическими, акустическими» [11].

Для сжигания газового топлива в печах применяются два типа горелок:

- горелки инжекционного типа, в которых газ смешивается с воздухом в смесительной камере перед входом в камеру сгорания;

- горелки, в которых газ смешивается с воздухом в самой камере сгорания.

Инжекционные горелки наиболее широко используются в трубчатых печах. Они обладают большей эффективностью благодаря низкому коэффициенту избытка воздуха. С помощью регулирования давления газа можно контролировать тепло-производительность горелок.

Однако, совместно с применением данного типа горелок необходимо использование специальных средств защиты не только для уменьшения вредных выбросов оксида азота, но и шума [14].

Факельные горелки применяют гораздо реже, поскольку они неравномерно распределяют теплоту на поверхности труб, отсюда не исключены частичные перегревы и быстрое истечение срока эксплуатации.

Комбинированные горелочные устройства помогают реализовать как раздельное применение топлива в газовой фазе и мазута, так и их одновременное сжигание. При таком способе жидкое топливо применяют как дополнительное к основному - газообразному топливу. Это позволяет значительно увеличить радиационные свойства (излучательную способность) факела. При добавке газа к мазуту и в случае из одновременного сжигания повышаются геометрические характеристики комбинированного факела и снижается содержание токсичных и загрязняющих ингредиентов в продуктах сгорания. В газомазутных ГУ топливо подают по двум разным (не объединенным) каналам, при всем этом именно мазут подают по внутренней трубке, по причине его плохом смешивании с воздухом.

Таким образом, использование комбинированных горелочных устройств в современных трубчатых печах является наиболее целесообразным и высокоэффективным.

4 Технологический расчет печи

4.1 Расчет процесса горения топлива

Цель: определение удельной теплоты сгорания топлива, состава продуктов сгорания и их энтальпии.

«Горение есть процесс окисления органической массы топлива. Как и всякая химическая реакция, горение зависит от температуры: с повышением температуры горения уменьшается время, необходимое для сжигания топлива» [15].

«Расчет процесса горения топлива в трубчатых печах ведется либо по его элементарному составу, либо с использованием диаграмм теплосодержания продуктов сгорания конкретного топлива при различных коэффициентах избытка воздуха» [16].

Компоненты газообразного топлива и их количество представлены в таблице 7. Расчет ведем для получения 100 моль топливного газа.

Таблица 7 – Результаты расчета количества молей компонентов топлива

Компоненты топлива	Мольные проценты	Молекулярный вес компонентов	Вес компонентов, кг на 100 моль топлива	Формулы образования компонентов топлива	Количество элементов, моль	
					углерод	водород
H ₂	55,4	2	110,8	1H ₂	-	55,4
CH ₄	12,2	16	195,2	1C+2H ₂	12,2	24,4
C ₂ H ₆	6,5	30	195	2C+3H ₂	13,0	19,5
C ₃ H ₈	9,4	44	413,6	3C+4H ₂	28,2	37,6
C ₄ H ₁₀	14,8	58	858,4	4C+5H ₂	59,2	74,0
C ₅ H ₁₂	1,5	72	108	5C+6H ₂	7,5	9,0
C ₆ H ₁₄	0,2	86	17,2	6C+7H ₂	1,2	1,4
Сумма	100,00	-	1898,2	-	121,3	221,3

«В горючую массу топлива входят вещества, состоящие главным образом из углерода и водорода, а также из сравнительно небольшого количества серы, кислорода и азота. Кроме того. В качестве балласта топливо может содержать влагу и вещества, образующие золу» [17].

Расчет ведем по углероду и водороду. Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты расчета углерода и водорода в составе топлива

Компоненты	Количество на 100 моль топлива, моль	Элементарный состав топлива		Массовое количество, %
		в моль/кг	в кг/кг	
C	121,3	121,3/1898,2 =0,0639	0,06332*12 =0,7668	76,68
H ₂	221,3	221,3/1898,2 =0,11658	0,11658*2 =0,2332	23,32
Сумма	-	-	1,0000	100,00

«Учитывая аддитивность теплотворной способности и наличие в литературе данных о теплотворной способности некоторых индивидуальных веществ, теплотворную способность смешанного топлива, в том числе газообразного, можно определить по правилу смешения» [17]:

$$Q_{см} = \sum Q_i \alpha_i, \quad (1)$$

где Q_i – удельная теплота сгорания всех элементов топливного газа, кДж/кг;

α_i – объемная концентрация всех элементов топливного газа.

Молекулярную массу определяем по формуле:

$$M_m = \sum M_i \alpha_i, \quad (2)$$

где M_i – молекулярная масса каждого элемента, кг/моль.

$$M_m = 2 * 0,554 + 16 * 0,122 + 30 * 0,065 + 44 * 0,094 + 58 * 0,148 + 72 * 0,015 + 86 * 0,002 = 18,982 \text{ кг/моль} \quad (3)$$

Определим плотность топлива:

$$\rho_T = \frac{M_m}{22,4}, \quad (4)$$

$$\rho_T = \frac{18,982}{22,4} = 0,847 \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

«Низшей или рабочей теплотой сгорания топлива называется количество тепла, которое выделяется при полном сгорании топлива, но при условии, что водяные пары, образующиеся при горении, не конденсируются» [15].

«Дымовые газы обычно не охлаждаются до температуры конденсации водяных паров, поэтому для практических расчетов пользуются низшей теплотой сгорания» [15].

$$Q_{\text{см}}^H = (Q_{H_2}^H * \alpha_{H_2} + Q_{CH_4}^H * \alpha_{CH_4} + Q_{C_2H_6}^H * \alpha_{C_2H_6} + Q_{C_3H_8}^H * \alpha_{C_3H_8} + Q_{C_4H_{10}}^H * \alpha_{C_4H_{10}} + Q_{C_5H_{12}}^H * \alpha_{C_5H_{12}} + Q_{C_6H_{14}}^H * \alpha_{C_6H_{14}}) / \rho_T \quad (6)$$

$$Q_{\text{см}}^H = (120900 * 0,554 + 49789,6 * 0,122 + 47279,2 * 0,065 + 46233,2 * 0,094 + 45605,6 * 0,148 + 45396,4 * 0,015 + 45103,52 * 0,002) / 0,847 = 103781 \text{ кДж/кг} \quad (7)$$

«Количество воздуха, необходимое для горения топлива, определяется на основе уравнений реакций горения. В нефтезаводских печах при сжигании жидкого и газообразного топлива обычно имеет место практически полное горение [15]».

«Теоретический расход воздуха, необходимый для сжигания 1 кг жидкого или газообразного топлива,

$$L_0 = \frac{2,67C + 8H + S - O}{23,2} \text{ кг/кг}, \quad (8)$$

где С, Н, S и О – содержание в топливе углерода, водорода, серы и кислорода в % мас. [14]».

$$L_0 = \frac{2,67 * 76,68 + 8 * 23,32}{23,2} = 16,87 \text{ кг/кг} \quad (9)$$

Тогда фактический расход воздуха для сжигания 1 кг топлива будет равен:

$$L = \alpha L_0, \quad (10)$$

где α – коэффициент избытка воздуха.

$$L = 1,15 * 16,87 = 19,4 \text{ кг/кг} \quad (11)$$

«Теоретически необходимый объем воздуха

$$V_0 = \frac{L_0}{1,293} = \frac{2,67C + 8H + S - O}{23,2 \cdot 1,293}, \quad (12)$$

где 1,293 - плотность воздуха при нормальных условиях в кг/м^3 » [14, стр. 109].

$$V_0 = \frac{16,87}{1,293} = 13,05 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (13)$$

Количество продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 кг топлива:

$$G = 1 + L, \quad (14)$$

$$G = 1 + 19,4 = 20,4 \text{ кг/кг} \quad (15)$$

Количество газов, образующихся при сгорании 1 кг топлива:

$$G_{CO_2+SO_2} = \frac{3,67C}{100} + \frac{2S}{100}, \quad (16)$$

$$G_{CO_2+SO_2} = \frac{3,67 * 76,68}{100} + \frac{2 * 0}{100} = 2,81 \text{ кг/кг}, \quad (17)$$

$$G_{H_2O} = \frac{9H}{100} + \frac{W}{100}, \quad (18)$$

$$G_{H_2O} = \frac{9 * 23,32}{100} + \frac{0}{100} = 2,1 \text{ кг/кг}, \quad (19)$$

$$G_{N_2+O_2} = L_0(\alpha - 0,232), \quad (20)$$

$$G_{N_2+O_2} = 16,87 * (1,15 - 0,232) = 15,49 \text{ кг/кг} \quad (21)$$

Проверяем выполнение данного равенства:

$$\sum G_i = G, \quad (22)$$

$$2,81 + 2,1 + 15,49 = 20,4 \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \quad (23)$$

Найдем объемное количество всех выходящих газов:

$$V_{CO_2+SO_2} = \frac{G_{CO_2} * 22,4}{M_{CO_2}} + \frac{G_{SO_2} * 22,4}{M_{SO_2}}, \quad (24)$$

$$V_{CO_2+SO_2} = \frac{2,81 * 22,4}{44} + \frac{0 * 22,4}{64} = 1,43 \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (25)$$

$$V_{H_2O} = \frac{G_{H_2O} * 22,4}{M_{H_2O}} + \frac{G_W * 22,4}{M_W}, \quad (26)$$

$$V_{H_2O} = \frac{2,1 * 22,4}{18} + \frac{0 * 22,4}{18} = 2,61 \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (27)$$

$$V_{N_2+O_2} = \frac{G_{N_2} * 22,4}{M_{N_2}} + \frac{G_{O_2} * 22,4}{M_{O_2}}, \quad (28)$$

$$V_{N_2+O_2} = \frac{11,87 * 22,4}{28} + \frac{3,62 * 22,4}{32} = 12,03 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (29)$$

Тогда общий объем будет равен:

$$V_{п.г.} = V_{CO_2+SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2+O_2}, \quad (30)$$

$$V_{п.г.} = 1,43 + 2,61 + 12,03 = 16,07 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (31)$$

Определим общую плотность продуктов:

$$\rho_{п.г.} = \frac{G}{V_{п.г.}}, \quad (32)$$

$$\rho_{п.г.} = \frac{20,4}{16,07} = 1,269 \text{ кг/м}^3 \quad (33)$$

Определим суммарную удельную теплоемкость продуктов сгорания по формуле:

$$C_{ср} = G_{CO_2} * C_{CO_2} + G_{SO_2} * C_{SO_2} + G_{H_2O} * C_{H_2O} + G_{N_2} * C_{N_2} + G_{O_2} * C_{O_2} \quad (34)$$

Теплоемкости компонентов при различных температурах на выходе радиационной камеры представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Значение теплоемкостей продуктов сгорания

Газообразный продукт	Теплоемкость, кДж/(кг*К)		
	t = 750°C	t = 500°C	t = 215°C
Диоксид углерода (CO ₂)	2,125	2,058	1,958
Диоксид серы (SO ₂)	2,125	2,058	1,958
Вода (H ₂ O)	2,058	1,983	1,887
Азот (N ₂)	2,133	2,096	2,083
Кислород (O ₂)	2,062	2,016	1,974

При температуре перевала 750°C (1023 К):

$$C_{cp} = 2,81 * 2,125 + 0 * 2,125 + 2,1 * 2,058 + 11,87 * 2,133 + 3,62 * 2,062 = 43,076 \text{ кДж}/(\text{кг} * \text{К}) \quad (35)$$

При температуре перевала 500°C (773К):

$$C_{cp} = 2,81 * 2,058 + 0 * 2,058 + 2,1 * 1,983 + 11,87 * 2,096 + 3,62 * 2,016 = 42,12 \text{ кДж}/(\text{кг} * \text{К}) \quad (36)$$

Для каждой температуры определим удельную энтальпию продуктов:

$$I = C_{cp} t_{п}, \quad (37)$$

$$I_{1023} = 43,076 * 1023 = 44066,75 \text{ кДж}/\text{кг}, \quad (38)$$

$$I_{773} = 42,12 * 773 = 32558,76 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (39)$$

Таким образом, рассчитан процесс горения газообразного топлива в трубчатой печи. Рассмотрен состав продуктов по всем элементам. Рассчитана суммарная удельная теплота сгорания топлива и удельная энтальпия.

4.2 Тепловой баланс трубчатой печи

Цель: составление теплового баланса, определение коэффициента полезного действия и расхода топливного газа в трубчатых печах.

«В общем случае тепловой баланс печи формулируется следующим образом:

$$Q^H = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (40)$$

где Q^H – наименьшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

Q_1 – полезно использованное тепло, кДж/кг;

Q_2 – тепло, теряемое с отходящими газами, кДж/кг;

Q_3 – тепло, теряемое от химической неполноты горения, кДж/кг;

Q_4 – тепло, теряемое от механической неполноты горения, кДж/кг;

Q_5 – тепло, теряемое излучением, кДж/кг [15, стр. 114-115]».

«Потерю тепла от химической неполноты горения в нефтезаводских печах можно принимать $q_3 = 0$. Практически величина этих потерь иногда достигает 0,5-1%. Потерями тепла от механической неполноты горения для жидкого и газообразного топлива практически можно пренебречь и принять $q_4 = 0$ [15, стр. 115]».

Рассчитаем потери тепла при выходе дымовых газов:

$$Q_2 = C_{cp}(t_2 - t'_0), \quad (41)$$

где C_{cp} – удельная теплоемкость всех продуктов горения, кДж/(кг*К);

$t_2 = 410^\circ\text{C}$ – температура пचेи;

$t'_0 = 20^\circ\text{C}$ – начальная температура среды.

Средняя температура будет равна:

$$t_{cp} = (410+20)/2 = 215^{\circ}\text{C} = 488^{\circ}\text{K} \quad (42)$$

Определим общую удельная теплоемкость продуктов горения при температуре 215°C (488°K):

$$C_{cp} = G_{CO_2} * C_{CO_2} + G_{SO_2} * C_{SO_2} + G_{H_2O} * C_{H_2O} + G_{N_2} * C_{N_2} + G_{O_2} * C_{O_2}, \quad (43)$$

$$C_{cp} = 2,81 * 1,958 + 0 * 1,958 + 2,1 * 1,887 + 11,87 * 2,083 + 3,62 * 1,974 = 41,336 \text{ кДж}/(\text{кг} * \text{K}), \quad (44)$$

$$Q_2 = 41,336 * (683 - 293) = 16121,04 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (45)$$

Потери тепла при излучении принимаем равным 5% от наименьшей теплоты сгорания:

$$Q_5 = 0,05 * Q_{cm}^H = 0,05 * 103781 = 5189,05 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (46)$$

Из уравнения теплового баланса определяем полезно использованное тепло:

$$Q_1 = Q^H - Q_2 - Q_5 = 103781 - 16121,04 - 5189,05 = 82470,91 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (47)$$

Определяем КПД трубчатой печи:

$$\eta_{п} = 1 - \left(\frac{Q_2}{Q^H} + \frac{Q_5}{Q^H} \right), \quad (48)$$

$$\eta_{п} = 1 - \left(\frac{16121,04}{103781} + \frac{5189,05}{103781} \right) = 0,795 \quad (49)$$

Определяем КПД топки:

$$\eta_T = 1 - \frac{Q_5}{Q_H} = 1 - \frac{5189,05}{103781} = 0,95 \quad (50)$$

Расход топлива определяется по уравнению

$$B = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_H \eta_T}, \quad (51)$$

где $Q_{\text{пол}}$ – полезно использованное тепло.

«В общем случае полезно использованное тепло, или полезная тепловая нагрузка печи, складывается из количества тепла, которое надлежит передать продукту в печи для его нагрева, испарения и перегрева паров, тепла, затрачиваемого на реакцию и на перегрев сухого водяного пара [15, стр. 116]».

$$Q_{\text{пол}} = G[eI_2 + (1 - e)i_2 - i_1] + GxQ_p + G_{\text{в.п.}}c_z(t_{\text{п}} - t_{\text{н}}), \quad (52)$$

где $G = 380000$ кг/ч – производительность по сырью;

$e = 0,08$ – массовая доля отгона продукта на выходе из печи;

I_2 – удельная энтальпия паров на выходе из печи, кДж/кг;

i_2 – удельная энтальпия жидкости на выходе из печи, кДж/кг;

i_1 – удельная энтальпия сырья на входе в печь, кДж/кг;

x – глубина превращения;

Q_p – тепловой эффект реакции, кДж/кг;

$G_{\text{в.п.}} = 9000$ кг/ч – количество водяного пара, подлежащего перегреву;

$c_z = 7,118$ кДж/кг*°С – удельная теплоемкость водяного пара;

$t_{\text{п}} = 465^\circ\text{C}$ – температура перегрева водяного пара;

$t_{\text{н}} = 150^\circ\text{C}$ – начальная температура водяного пара.

«Ниже приводится ряд эмпирических формул для подсчета теплоемкостей и теплосодержаний жидких и парообразных нефтепродуктов [16, стр. 73-74]».

Удельную энтальпию паров на выходе из печи определим по формуле:

$$I_2 = (A * B - 73,8) * 4,184, \quad (53)$$

где A , B – значения, вычисленные Б.П. Воиновым в зависимости от температуры на выходе из печи $t = 410^\circ\text{C}$ и относительной плотности несконденсировавшихся паров $\rho_4^{20} = 0,8$.

$$I_2 = (111,84 * 3,196 - 73,8) * 4,184 = 1188,42 \text{ кДж/кг} \quad (54)$$

Удельную энтальпию жидкости на выходе из печи определим по формуле:

$$i_2 = a * b * 4,184, \quad (55)$$

где a , b – значения, вычисленные Б.П. Воиновым в зависимости от температуры на выходе из печи $t = 410^\circ\text{C}$ и относительной плотности мазута $\rho_4^{20} = 0,95$.

$$i_2 = 211,62 * 1,024 * 4,184 = 906,67 \text{ кДж/кг} \quad (56)$$

Удельную энтальпию сырья на входе в печь определим по формуле:

$$i_1 = a * b * 4,184, \quad (57)$$

где a , b – значения, вычисленные Б.П. Воиновым в зависимости от температуры на входе в печь $t = 260^\circ\text{C}$ и относительной плотности мазута $\rho_4^{20} = 0,95$.

$$i_1 = 132,16 * 1,024 * 4,184 = 566,23 \text{ кДж/кг} \quad (58)$$

Химических реакций в аппарате не протекает. Поэтому теплотой, выделяемой при их протекании можно пренебречь.

Рассчитаем полезную тепловую нагрузку печи:

$$\begin{aligned} Q_{\text{пол}} &= 380000[0,08 * 1188,42 + (1 - 0,08) * 906,67 - 566,23] + \\ &+ 380000 * 0 * 0 + 9000 * 7,118(465 - 150) = 158111930 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}} = \\ &= 43,92 \text{ МВт} \end{aligned} \quad (59)$$

Определяем расход топливного газа:

$$B = \frac{158111930}{103781 * 0,81} = 1880,9 \text{ кг/ч} \quad (60)$$

Таким образом, составлен тепловой баланс трубчатой печи. Рассчитаны коэффициенты полезного действия печи и топки, а также расход топливного газа.

Для дальнейшего выбора типоразмера печи определена ее полезная тепловая нагрузка.

«Печи каждого типа имеют несколько типоразмеров, различающихся способом сжигания топлива, числом камер, поверхностью нагрева и длиной труб змеевика» [2].

Для дальнейшего выбора типоразмера печи определена ее полезная тепловая нагрузка, которая составила 43,92 МВт.

Полезная тепловая нагрузка это количество тепла, переданного в печи сырью. Она зависит от тепловой мощности и размеров печи.

Тепловая нагрузка большинства эксплуатируемых печей 8-16 МВт.

Перспективными являются более мощные печи с тепловой нагрузкой от 40 МВт и более.

4.3 Выбор типа трубчатой печи

Цель: подобрать подходящий для процесса тип трубчатой печи.

Для переработки мазута во вторичное сырье печь должна обеспечивать: нагрев продукта, его частичное испарение, перегрев водяного пара. Необходимая производительность трубчатой печи - 43,92 МВт. Топливом является газ.

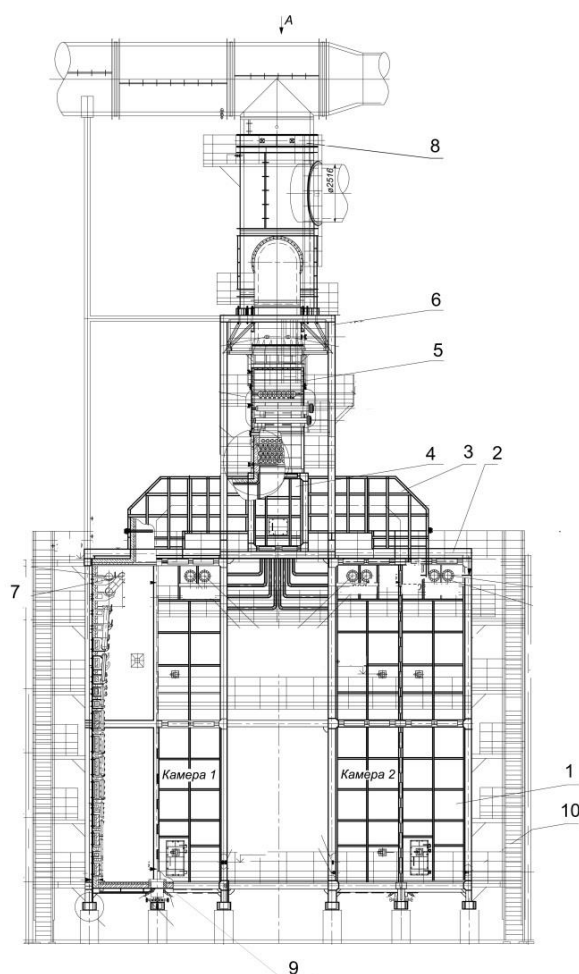
«Выбор трубчатой печи определяется соответствием ее заданным параметрам и требованиям, долговечностью, оптимальными теплотехническими характеристиками, удобством эксплуатации и ремонта, технико-экономическими показателями» [16].

По каталогу подобрана наиболее подходящая под изначальные условия трубчатая печь. Печь типа АП-КСГ-38,55 работает на комбинированном топливе. В таблице 10 приведена техническая характеристика печи.

Таблица 10 – Техническая характеристика печи АП-КСГ-38,55

Характеристика	Значение
Радиантные трубы: площадь поверхности нагрева, м ² среднее теплонапряжение, Вт/м ²	1207 27180
Конвективные трубы: площадь поверхности нагрева (гладких /орезбренных), м ²	102/1290
Трубы пароперегревателя: площадь поверхность нагрева, м ²	681
Теплопроизводительность полезная, МВт	44,67
Производительность печи по мазуту, кг/ч	380000
Габаритные размеры (с площадками для обслуживания), м: длина ширина высота	19,215 19,056 26,250
Масса, т: металла печи (без площадок) футеровки	819,5 320,218

Схема конструкции печи типа АП-КСГ представлена на рисунке 10.



1 – камера радиации; 2 – свод; 3 – газоходы; 4 – газосборник; 5 – камера конвекции; 6 – дымоход; 7 – змеевик; 8 – шибер; 9 – горелки; 10 – площадки обслуживания

Рисунок 10 – Трубчатая печь типа АП-КСГ

Трубчатая печь имеет свободный факел горения.

В радиационной камере змеевики расположены в горизонтальном положении.

Два вида горелок находятся внизу печи в одном ряду. Облучение экранов от вертикальных факелов происходит со всех сторон.

Горелочное устройство - комбинированного типа, поэтому есть возможность использования как жидкого, так и газообразного топлива. Дымовые газы выходят через отдельный дымоход.

4.4 Расчет камеры радиации

Цель: определение температуры образованных газов в процессе сгорания топлива, расчет теплонапряженности поверхности труб радиации.

«В радиантной камере на теплопередачу влияет ряд факторов: характер топлива, коэффициент избытка воздуха, способ сжигания топлива, форма и величина поверхности экранных труб, форма и размеры самой топки и др.» [17].

Поскольку расчет радиантной камеры является наиболее сложным и трудоемким, воспользуемся упрощенным вариантом.

«Расчет радиантной камеры сводится к определению температуры продуктов сгорания топлива на выходе из топки T_T (t_T) методом последовательных приближений» [16].

«Значение температуры дымовых газов на перевале, т.е. при переходе из топочной камеры в конвекционную, должно быть в некоторых границах. Верхняя граница этой температуры принимается, исходя из допустимой теплонапряженности для первых рядов труб конвекционной секции, которая в свою очередь зависит от характера нагреваемого сырья, скорости его движения в трубах и качеств металла труб» [17]. Диапазон температуры покидающих топку газов составляет $1000 \div 1200^\circ\text{K}$.

«Температура продуктов сгорания на выходе из топки рассчитывается из сопоставления уравнения теплового баланса радиантной камеры и эквивалентной закрытой топки. Связь эффективной температуры топочной среды ($T^{\text{эф}}$) и балансовой температуры газов сгорания на выходе из топки T_T выражается через относительную эффективную температуру топочной среды

$\theta = \frac{T^{\text{эф}}}{T_T}$, K» [14, стр. 45]:

$$T_T = 100 \sqrt[4]{\frac{1}{\psi} \left[\frac{1}{C_s} * \frac{H_p}{H_s} (q_p - q_{\text{рк}}) + \left(\frac{\theta}{100} \right)^4 \right]}, \quad (61)$$

где q_p и $q_{рк}$ – теплонапряженность поверхности радиантных труб фактическая и приходящаяся на долю свободной конвекции, Вт/м²;

$H_p = 1207$ м² – поверхность нагрева радиантных труб;

H_p/H_s – отношение поверхностей, зависящее от типа печи, от вида и способа сжигания топлива, принимаем $H_p/H_s = 3,44$ [14, рис. 4, стр 172];

θ – средняя температура наружной стенки радиантных труб, К;

$\psi = 1,2$ – коэффициент, для топок со свободным факелом;

$C_s = 5,68$ Вт/м²К – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела.

Таким образом, методом последовательных приближений мы рассчитываем все основные параметры для нескольких значений температур в заданном диапазоне. Далее находим температуру покидающих топку газов, которая должна совпасть с ранее принятым значением с достаточной точностью. Если это не так, то продолжаем итерацию.

Предположим, что температура выходящих продуктов 1000°К.

Теплоемкости продуктов при 1000К: $C_{CO_2} = 1,070$ кДж/кг*К; $C_{H_2O} = 2,051$ кДж/кг*К; $C_{O_2} = 1,0078$ кДж/кг*К; $C_{N_2} = 1,090$ кДж/кг*К; $C_{SO_2} = 0,756$ кДж/кг*К.

«Энтальпия продуктов горения топлива определяется как сумма энтальпий отдельных его компонентов. Энтальпия отдельных компонентов продуктов горения равна произведению средней молярной или массовой теплоемкости на количество данного компонента и на температуру» [15].
Рассчитаем энтальпию сгорания газов при данной температуре:

$$I = (T_{п} - 273)(G_{CO_2} * C_{CO_2} + G_{SO_2} * C_{SO_2} + G_{H_2O} * C_{H_2O} + G_{N_2} * C_{N_2} + G_{O_2} * C_{O_2}), \quad (62)$$

$$I = (1000 - 273)(2,81 * 1,070 + 0 * 0,756 + 2,1 * 2,051 + 11,87 * 1,090 + 3,62 * 1,0078) = 17376 \text{ кДж/кг} \quad (63)$$

«Максимальной температурой горения называется температура, которую имели бы продукты горения, если бы все тепло, выделившееся при горении топлива, было использовано на их нагрев. Фактически не все тепло, выделившееся при горении топлива, может быть использовано для нагрева продуктов горения, так как часть его теряется в окружающую среду вследствие излучения стенок кладки. Тепло, теряемое в окружающую среду, учитывается коэффициентом полезного действия топки» [15].

Определим наибольшую температура выходящих из топки газов:

$$T_{max} = T_0 + \frac{Q_p^H * \eta_T}{\sum G_i C_i}, \quad (64)$$

где $T_0 = 293^\circ\text{K}$ – температура поступающего в систему воздуха;

$\eta_T = 0,95$ – к.п.д. топки.

$$T_{max} = 293 + (103781 * 0,95 / (2,81 * 1,070 + 0 * 0,756 + 2,1 * 2,051 + 11,87 * 1,090 + 3,62 * 1,0078)) = 4418^\circ\text{K} \quad (65)$$

Теплоемкости выходящих продуктов при наибольшей температуре:
 $C_{CO_2} = 1,2259$ кДж/кг*К; $C_{H_2O} = 2,5544$ кДж/кг*К; $C_{O_2} = 1,1229$ кДж/кг*К; $C_{N_2} = 1,2142$ кДж/кг*К; $C_{SO_2} = 0,867$ кДж/кг*К.

Рассчитаем энтальпию газов при 4418°K :

$$I_{max} = (T_{max} - 273)(G_{CO_2} * C_{CO_2} + G_{SO_2} * C_{SO_2} + G_{H_2O} * C_{H_2O} + G_{N_2} * C_{N_2} + G_{O_2} * C_{O_2}), \quad (66)$$

$$I_{max} = (4418 - 273)(2,81 * 1,2259 + 0 * 0,867 + 2,1 * 2,5544 + 11,87 * 1,2142 + 3,62 * 1,1229) = 113102 \text{ кДж/кг} \quad (67)$$

Энтальпия выходящих из топки газов при температуре T_{yx} :

$$I_{yx} = q_{yx} = 14467,6 \text{ кДж/кг} \quad (68)$$

«Расчет суммарной теплоотдачи в топочной камере сводится к определению коэффициента прямой отдачи μ , представляющего собой, как отмечалось ранее, отношение общего количества тепла, переданного радиантным трубам (слагающегося из теплоотдачи радиации и свободной конвекцией), к общему полезному теплу, внесенному топливом» [15].

Найдем коэффициент прямой отдачи по формуле:

$$\mu = \frac{I_{max}\eta_T - I}{I_{max}\eta_T - I_{yx}}, \quad (69)$$

$$\mu = \frac{113102 * 0,95 - 17376}{113102 * 0,95 - 14467,6} = 0,938 \quad (70)$$

Фактическая теплонапряженность поверхности радиантных труб:

$$q_p = \frac{Q_{пол}}{H_p} * \mu, \quad (71)$$

$$q_p = \frac{43,92 * 10^6}{1207} * 0,938 = 34132 \text{ Вт/м}^2\text{ч} \quad (72)$$

«Температура продукта на переходе из конвективной камеры в радиантную участвует в дальнейших расчетах при определении средней температуры наружной поверхности радиантных труб, а также при расчете конвективной камеры» [16].

Температура наружной стенки экрана вычисляется по формуле:

$$\theta = t_{cp} + 273 + \frac{q_p}{\alpha_2} + \frac{q_p * \delta}{\lambda} + \frac{q_p * \delta_{зол}}{\lambda_{зол}}, \quad (73)$$

где $\alpha_2 = 1225 \text{ Вт/м}^2\text{*К}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемому продукту;

$\delta = 0,006$ м. – толщина стенки трубы;

$\lambda = 19$ Вт/м*К – коэффициент теплопроводности стенки трубы;

$\delta_{\text{зол}}/\lambda_{\text{зол}} = 0,001$ м²*К/Вт – отношение толщины к коэффициенту теплопроводности золных отложений для газообразных топлив;

$t_{\text{ср}}$ – средняя температура продукта в змеевике, °С.

«Температура продукта в змеевике радиантной камеры рассчитывается как среднеарифметическая величина температур на переходе из конвективной камеры в радиантную и на выходе из топки (печи)» [16].

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} = \frac{260 + 380}{2} = 320 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (74)$$

$$\begin{aligned} \theta &= 320 + 273 + \frac{34132}{1225} + \frac{34132 * 0,006}{19} + 34132 * 0,001 = \\ &= 665,8 \text{ } ^\circ\text{K} \end{aligned} \quad (75)$$

«Относительное количество тепла, воспринимаемое радиантным змеевиком за счет конвекции, в зависимости от уровня температур может составлять 5-20% от всей тепловой нагрузки в топке» [16]. Теплонапряженность поверхности радиантных труб, приходящуюся на долю свободной конвекции определим по формуле:

$$q_{\text{рк}} = 2,09 \sqrt[4]{T_{\text{п}} - \theta} (0,9T_{\text{п}} - \theta), \quad (76)$$

$$q_{\text{рк}} = 2,09 \sqrt[4]{1000 - 665,8} * (0,9 * 1000 - 665,8) = 2093 \text{ Вт/м}^2 \quad (77)$$

Рассчитаем температуру дымовых газов на выходе из топки:

$$\begin{aligned} T_{\text{п}} &= 100 \sqrt[4]{\frac{1}{1,2} \left[\frac{1}{5,68} * 3,44 * (34132 - 2093) + \left(\frac{665,8}{100} \right)^4 \right]} = \\ &= 1155 \text{ } ^\circ\text{K} \end{aligned} \quad (78)$$

Полученное значение отличается от изначально принятого, поэтому продолжаем итерацию. Произведем аналогичные расчёты для $T_{п} = 1155 \text{ }^{\circ}\text{K}$.

Результаты расчетов сведены в таблицу 11.

Таблица 11 – Определение температуры продуктов сгорания

№	I, кДж/кг	T_{\max} , °K	I_{\max} , кДж/кг	μ	q_p , Вт/м ²	θ , °K	$q_{рк}$, Вт/м ²	$T_{п}$, °K
1	17376	4418	113102	0,938	34132	665,8	2093	1155
2	21474	4342	111040	0,923	33587	664,6	3687	1137
3	21123	4326	110587	0,926	33715	664,9	3492	1140
4	21153	4334	110813	0,926	33709	664,9	3524	1140

Таким образом, методом последовательных приближений определена температура выходящих из топки газов.

Её значение составило 1140°K .

4.5 Расчет диаметра печных труб

Цель: подбор оптимального размера труб.

Определим объемный расход продукта:

$$V = \frac{G}{3600\rho}, \quad (79)$$

где G – производительность трубчатой печи, кг/ч;

$\rho = 772,8 \text{ кг/м}^3$ – плотность продукта при средней температуре $t = 325^{\circ}\text{C}$.

$$V = \frac{380000}{3600 * 772,8} = 0,1366 \text{ м}^3/\text{с} \quad (80)$$

Площадь поперечного сечения трубы определим по формуле:

$$S = \frac{V}{n * W} = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4}, \quad (81)$$

где $n = 8$ – число потоков;

$W = 1$ м/с – скорость мазута;

$d_{\text{вн}}$ – расчетный внутренний диаметр трубы, м.

Найдем внутренний диаметр по формуле:

$$d_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{4V}{n\pi W}} = \sqrt{\frac{4 * 0,1366}{8 * \pi * 1}} = 0,147 \text{ м} \quad (82)$$

Таким образом, принимаем наиболее близкое к рассчитанному значение диаметра стандартных труб $d_{\text{вн}} = 0,152$ м.

4.6 Расчет камеры конвекции

Цель: расчет коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи конвективной камеры.

Основное значение конвективной камеры заключается в переходе тепла от газового потока к трубам конвекции и радиации.

Камера имеет два участка: с оребренными и гладкими трубами. Рассмотрим процесс теплообмена в каждом из них.

4.6.1 Участок пучка с гладкими трубами

Определим коэффициент теплоотдачи камеры для участка с гладкими трубами:

$$\alpha_{\text{к}} = 0,35E \frac{u^{0,6}}{d^{0,4}}, \quad (83)$$

где $E = 22,8$ – коэффициент, зависящий от физических свойств топочных газов;

u – массовая скорость, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$;

d – диаметр труб, м.

Рассчитаем скорость выходящих газов:

$$u = \frac{B * G}{3600 * f}, \quad (84)$$

где $B = 1880,9$ кг/ч – часовой расход топлива;

$G = 20,4$ кг/кг – количество продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 кг топлива;

f – свободное сечение прохода дымовых газов в камере конвекции, м^2 .

Определим свободное сечение для гладкотрубных пучков, которые находятся в конвективных камерах с ретурбедными камерами и в которых отсутствует просвет в гранях камеры для прохода выходящих газов:

$$f = (b_k - z_1 d) l_k, \quad (85)$$

где $b_k = 1,62$ м – ширина камеры;

$z_1 = 8$ шт – количество труб;

$d = 0,118$ м – наружный диаметр труб змеевика;

$l_k = 12,5$ м – длина камеры.

$$f = (1,62 - 8 * 0,118) * 12,5 = 8,45 \text{ м}^2 \quad (86)$$

Тогда скорость выходящих газов и коэффициент теплоотдачи камеры будут равны:

$$u = \frac{1880,9 * 20,4}{3600 * 8,45} = 1,26 \text{ кг/м}^2 * \text{с} , \quad (87)$$

$$\alpha_k = 0,35 * 22,8 * \frac{1,26^{0,6}}{0,118^{0,4}} = 21,55 \text{ Вт/м}^2 * \text{град} \quad (88)$$

Для участка с гладкими трубами коэффициент теплоотдачи радиацией газов определяем по приближенной эмпирической формуле:

$$\alpha_p = \frac{0,01605t}{a(1,23 - 0,00115\theta_k)(0,5\alpha + 0,4)} , \quad (89)$$

где $t = 625^\circ\text{C}$ – средняя температура газов в камере конвекции;

$\theta_k = 355^\circ\text{C}$ – средняя температура стенки труб;

$\alpha = 1,15$ – коэффициент избытка воздуха;

a – коэффициент, зависящий от толщины газового слоя и от типа топлива.

Рассчитаем толщину газового слоя:

$$S = 3,49s - 4,1d , \quad (90)$$

где $s = 0,2$ м – расстояние между осями труб;

$d = 0,118$ м – диаметр труб.

$$S = 3,49 * 0,2 - 4,1 * 0,118 = 0,214 \quad (91)$$

$$a = 0,9$$

$$\alpha_p = \frac{0,01605 * 625}{0,9(1,23 - 0,00115 * 355)(0,5 * 1,15 + 0,4)} =$$

$$= 13,91 \text{ Вт/м}^2 * \text{град} \quad (92)$$

За счет радиации кладки коэффициент теплоотдачи становится на 10% больше:

$$\alpha_1 = 1,1(\alpha_k + \alpha_p), \quad (93)$$

$$\alpha_1 = 1,1(21,55 + 13,91) = 39,0 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} \quad (94)$$

Поскольку значение коэффициента теплопередачи к полученным газам α_2 в разы превышает значение коэффициента теплоотдачи α_1 от продуктов к стенкам камеры, можно принять коэффициент теплопередачи равном коэффициенту теплоотдачи α_1 :

$$K = \alpha_1 = 39,0 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} \quad (95)$$

Рассчитаем поверхностную плотность теплового потока:

$$q_k = K\Delta t, \quad (96)$$

где $\Delta t = 270^\circ\text{C}$ – температурный напор.

$$q_k = 39 \cdot 270 = 10530 \text{ Вт/м}^2 \quad (97)$$

Тогда тепловая нагрузка для пучка с гладкими трубами:

$$Q_k^\Gamma = H_k^\Gamma q_k, \quad (98)$$

где $H_k^\Gamma = 102 \text{ м}^2$ – поверхность нагрева гладких труб.

$$Q_k^\Gamma = 102 \cdot 10530 \cdot 10^{-6} = 1,074 \text{ МВт} \quad (99)$$

Рассмотрим участок пучка с оребренными трубами.

4.6.2 Участок пучка с оребренными трубами

Некоторые трубы в конвективной камере являются оребренными.

Определим свободное сечение для оребренных пучков, которые находятся в конвективных камерах с ретурбедными камерами и в которых отсутствует просвет в гранях камеры для прохода выходящих газов:

$$f = (b_k - z_1 d) l_k - \frac{2d_{рб} h_{рб} l_{ор}}{S_{рб}} * z_1, \quad (100)$$

где $b_k = 1,62$ м. – ширина камеры конвекции;

$z_1 = 8$ шт. – число труб в ряду;

$d = 0,118$ м. – наружный диаметр труб змеевика;

$l_k = 12,5$ м – длина камеры конвекции;

$d_{рб} = 0,0012$ м – толщина рёбер;

$h_{рб} = 0,026$ м – высота рёбер;

$l_{рб} = 12,5$ м – длина оребренной части трубы;

$S_{рб} = 0,010$ м – шаг размещения рёбер.

$$\begin{aligned} f &= (1,62 - 8 * 0,118) * 12,5 - \frac{2 * 0,0012 * 0,026 * 12,5}{0,010} * 8 = \\ &= 7,83 \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (101)$$

Тогда скорость выходящих газов и коэффициент теплоотдачи камеры будут равны:

$$u = \frac{1880,9 * 20,4}{3600 * 7,83} = 1,36 \text{ кг/м}^2 * \text{с}, \quad (102)$$

$$\alpha_k = 0,35 * 22,8 * \frac{1,36^{0,6}}{0,118^{0,4}} = 22,53 \text{ Вт/м}^2 * \text{град} \quad (103)$$

Коэффициент теплоотдачи радиации и толщина газового слоя рассчитываются по формулам (91) и (92) соответственно.

С учетом радиации кладки определим коэффициент теплоотдачи в камере:

$$\alpha_1 = 1,1(22,53 + 13,91) = 40,08 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} \quad (104)$$

Коэффициент теплопередачи будет равен:

$$K = \alpha_1 = 40,08 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} \quad (105)$$

Рассчитаем поверхностную плотность теплового потока:

$$q_k = 40,08 * 270 = 10821,6 \text{ Вт/м}^2 \quad (106)$$

4.6.3 Участок с ошипованными трубами

Для того чтобы увеличить площадь теплообмена предложено заменить участок оребренных труб на ошипованные.

Определим свободное сечение для ошипованных пучков, которые находятся в конвективных камерах с ретурбедными камерами и в которых отсутствует просвет в гранях камеры для прохода выходящих газов:

$$f = (b_k - z_1 d) l_k - \frac{2d_{ш} h_{ш} l_{оп}}{S_{ш}} * z_1, \quad (107)$$

где $b_k = 1,62$ м. – ширина камеры конвекции;

$z_1 = 8$ шт. – число труб в ряду;

$d = 0,118$ м. – наружный диаметр труб змеевика;

$l_k = 12,5$ м – длина камеры конвекции;

$d_{ш} = 0,012$ м – толщина шипов;

$h_{ш} = 0,032$ м – высота шипа;

$l_{ш} = 12,5$ м – длина ошипованной части трубы;

$S_{ш} = 0,016$ м – шаг размещения шипов.

$$f = (1,62 - 8 * 0,118) * 12,5 - \frac{2 * 0,012 * 0,032 * 12,5}{0,016} * 8 = 3,65 \text{ м}^2 \quad (108)$$

Тогда скорость выходящих газов и коэффициент теплоотдачи камеры будут равны:

$$u = \frac{1880,9 * 20,4}{3600 * 3,65} = 2,92 \text{ кг/м}^2 * \text{с}, \quad (109)$$

$$\alpha_k = 0,35 * 22,8 * \frac{2,92^{0,6}}{0,118^{0,4}} = 35,68 \text{ Вт/м}^2 * \text{град} \quad (110)$$

Коэффициент теплоотдачи радиации и толщина газового слоя рассчитываются по формулам (91) и (92) соответственно. С учетом радиации кладки определим коэффициент теплоотдачи в камере:

$$\alpha_1 = 1,1(35,68 + 13,91) = 54,55 \text{ Вт/м}^2 * \text{град} \quad (111)$$

Коэффициент теплопередачи будет равен:

$$K = \alpha_1 = 54,55 \text{ Вт/м}^2 * \text{град} \quad (112)$$

Рассчитаем поверхностную плотность теплового потока:

$$q_k = 54,55 * 270 = 14728,5 \text{ Вт/м}^2 \quad (113)$$

Поверхность нагрева пучка с ошипованными трубами:

$$H_k = \frac{Q_k}{q_k}, \quad (114)$$

$$Q_k = Q_{\text{п}} - Q_{\text{р}} - Q_{\text{к}}^{\text{г}}, \quad (115)$$

где $Q_{\text{п}} = 44,67$ МВт – тепловая мощность печи;
 $Q_{\text{р}} = 41,197$ МВт – тепловая нагрузка на камеру радиации;
 $Q_{\text{к}}^{\text{г}} = 1,074$ – тепловая нагрузка на участок конвективного пучка с гладкими трубами.

$$Q_{\text{к}} = 44,67 - 41,197 - 1,074 = 2,399 \text{ МВт}, \quad (116)$$

$$H_{\text{к}} = \frac{2,399 * 10^6}{14728,5} = 162,88 \text{ м}^2 \quad (117)$$

Рассчитаем необходимое количество труб:

$$n = \frac{H_{\text{к}}}{\pi d l_{\text{кт}}}, \quad (118)$$

где $l_{\text{кт}} = 14$ м. – длина трубы конвективного пучка с отводами.

$$n = \frac{162,88}{\pi * 0,118 * 14} = 31,4 \text{ шт} \quad (119)$$

Принимаем в качестве необходимого количества 32 ошипованные трубы (по 4 трубы на каждый поток). Результаты расчетов представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты расчета камеры конвекции

Характеристика:	Гладкие трубы	Оребренные трубы	Ошипованные трубы
Коэффициент теплоотдачи камеры, Вт/м ² * град	21,55	22,53	35,68
Скорость выходящих газов, кг/м ² * с	1,26	1,36	2,92
коэффициент теплоотдачи радиации, Вт/м ² * град	13,91	13,91	13,91
коэффициент теплопередачи, Вт/м ² * град	39,0	40,08	54,55
поверхностную плотность теплового потока, Вт/м ²	10530,0	10821,6	14728,5

Таким образом, был произведен расчет камеры конвекции. Определены коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи конвективной камеры для разных видов труб: гладких, оребренных и ошипованных.

Из таблицы 12 видно, что тепловые характеристики участков с оребренными трубами не намного превышают тепловые характеристики участков с гладкими трубами, в то время как показатели: коэффициент теплоотдачи и теплопередачи камеры, скорость выходящих газов, поверхностная плотность теплового потока для участков с ошипованными трубами значительно выше.

Поэтому в качестве модернизации трубчатой печи для нагрева мазута и его дальнейшую переработку во вторичное сырье предложено заменить участок оребренных труб на ошипованные. Это позволит повысить площадь теплообмена, увеличить коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, а следовательно и эффективность работы камеры конвекции и самой трубчатой печи.

5 Характеристика технологии энерго- и ресурсосбережения процесса получения вторичного сырья из мазута

«Нарастает дефицит углеводородного сырья, поэтому проблема использования нефти, угля и газа в качестве сырья, а не топлива приобретает особую актуальность» [18].

«Углубление переработки нефти – путь экономии этого невосполнимого стратегического ресурса» [19].

«Решение проблемы дальнейшего углубления переработки нефти будет предопределяться наличием сырья для загрузки мощностей по углубляющим процессам и освоения новых технологий для вовлечения в глубокую переработку тяжелых нефтяных остатков, т. е. процессов каталитического крекинга, висбрекинга, коксования и гидрогенизационной переработки» [1].

«Одной из острейших на НПЗ России является проблема быстрейшего обновления и модернизации устаревшего оборудования, машин и отдельных процессов с доведением их до современного мирового уровня» [20].

«Необходимы новые технологии и новая техника, замена физически и морально устаревших технологических процессов на более совершенные в техническом и более чистые в экологическом отношении безотходные процессы глубокой и комплексной переработки нефтяного сырья» [20].

«Разумеется, что НПЗ с высокой долей вторичных процессов располагает большей возможностью для производства из каждой тонны сырья большего количества более ценных, чем нефтяной остаток, нефтепродуктов и, следовательно, для более углубленной переработки нефти» [20].

«Глубина переработки нефти – величина, показывающая отношение объема продуктов переработки нефти к общему объему затраченной при переработке нефти. Она рассчитывается по следующей формуле:

Глубина переработки = (Объем переработки – Объем производства мазута – Объем потерь и топлива на собственные нужды) / Объем переработки * 100%» [21].

Таким образом, возникает необходимость более глубокой переработки нефтяных остатков, в частности мазута.

«Главным критерием оценки эффективности является замкнутость материальных и энергетических потоков в рамках единичного аппарата, цеха, группы цехов, предприятия» [22].

«Необходимость «следующего» перехода энергии является очевидной, поскольку современные энергетические системы просто неустойчивы во всех аспектах социальных, экономических и экологических критериев» [23].

Перед нефтяной промышленностью стоит вопрос о возможности в будущем перехода к возобновляемым источникам энергии [24]. И вопреки общепринятому мнению, нефтяная промышленность сможет обеспечивать устойчивое развитие с возобновляемой энергетикой [25]. Однако переход к более новым энергетическим системам часто требует значительных сдвигов не только в технологии, но и в политическом регулировании, тарифах и режимах ценообразования [26].

Разработка новых технологий получения вторичного сырья из мазута и усовершенствование уже используемых в настоящее время процессов является важной задачей со стороны ресурсосбережения. Технологические трубчатые печи являются одними из основных потребителей энергии в нефтеперерабатывающей промышленности. На крупных нефтеперерабатывающих заводах их доля в энергопотреблении достигает до 50-70%. Повышение эффективности при их использовании позволяет получить существенную экономию и заметно снизить энергозатраты в общем балансе затрат на производство продукции.

«В широком смысле понятие «энергоэффективность работы трубчатой печи» - это не только расход топлива на эксплуатацию печи или переработку тонны нефти, хотя эта статья занимает львиную долю в расходах. В это

понятие необходимо включать также расходы на эксплуатацию, поддержание заданных параметров во время эксплуатационного пробега и многое другое» [8].

«В общем случае на энергоэффективность влияют следующие факторы:

- расход топлива на нагрев продукта (полнота использования), или КПД печи;
- энергозатраты на поддержание работы печного блока;
- экологические показатели;
- уровень безопасности эксплуатации, соответствие системы управления печью нормам Ростехнадзора.

Основной и наиболее значимый фактор энергоэффективности – расход топлива» [8].

«Несмотря на сравнительно большие первоначальные затраты, стоимость тепла, отданного среде при правильно спроектированной печи, дешевле, чем при всех других способах нагрева до высоких температур. В качестве топлива могут применяться продукты отходов различных процессов, в результате чего не только используется тепло, получаемое при их сжигании, но часто устраняются и затруднения, связанные с обезвреживанием этих отходов» [20].

Повышение энергоэффективности и энергосберегающие технологии являются приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники в РФ (Указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011 г. №899). Для повышения энергоэффективности работы печи на нефтеперерабатывающем заводе ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегоррднефтеоргсинтез» за счет ошипования конвективной части змеевика. Таким образом, это позволит снизить потери с дымовыми газами и приведет к экономии топлива.

Модернизация трубчатой печи для нагрева мазута позволяет увеличить эффективность теплообмена, что обеспечит более глубокую переработку

тяжелых фракций нефти и решить ряд экологических и экономических проблем.

Например, при более тщательной переработки и получения вторичного сырья, уменьшается образование отходов, что также является важнейшей проблемой современности. А получение вторичных продуктов позволяет предприятию расширить ассортимент товарной продукции и открыть для себя новые рынки сбыта.

5.1 Продукты, получаемые при переработке мазута

«Котельное топливо (мазуты) применяют для паровых котлов тепловых электростанций, судовых установок, различных промышленных печей. Оно состоит из остатков прямой перегонки нефти, тяжелых газойлей каталитического крекинга, коксования и гидрокрекинга, крекинг-остатка, полученного термическим крекингом и висбрекингом, отходов от переработки масел (экстрактов, асфальтов) и тяжелых остатков нефтехимического синтеза» [27].

«В России топочный мазут является основным продуктом переработки нефти по объему производства: его доля в общем расходе топлива на нужды электроэнергетики достигает 13-13,5%. Большая часть вырабатываемых на отечественных нефтеперерабатывающих заводах котельных топлив является сернистой (содержание серы 2-3,5%)» [1].

«В результате из-за отсутствия на теплоэлектростанциях эффективных газоочистных установок, а также установок по обессериванию остаточных топлив на НПЗ в регионах, где сжигается большое количество сернистых мазутов, складывается неблагоприятная экологическая обстановка» [1].

Чтобы предотвратить загрязнение сернистыми соединениями окружающей среды при использовании мазута в качестве котельного топлива, в настоящее время разрабатываются новые технологии по переработки мазута в различные вторичные продукты.

«При перегонке мазута под вакуумом выкипают фракции, используемые для получения масел (масляные дистилляты). Причем ассортимент продуктов вакуумной перегонки мазута зависит от получаемого продукта – масел или топлив. Неиспарившаяся часть мазута – гудрон (или полугудрон), отбираемая из нижней части колонны, применяется как сырье для химических методов переработки нефти, производства битума и высоковязких масел» [5].

«Из отобранных фракций (дистиллятов) после их охлаждения, очистки и добавки различных присадок получают товарные сорта бензинов, керосинов и дизельных топлив. Мазут может использоваться как сырье для получения смазочных масел, как исходный продукт для вторичных методов переработки нефти и, при необходимости как жидкое топливо» [28].

На установке ВТ-2 предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» из мазута получают вторичное сырье, (таблица 11).

Таблица 11 – Вторичное сырье, получаемое из мазута на установке ВТ-2

Продукт	Применение	Показатели качества	Норма по НД
Фракция вакуумного дизельного топлива	Используется в качестве: - компонента сырья установок Л-24/7, ЛЧ-24/2000; - компонента фракции дизельного топлива; - компонента мазута топочного; - компонента вакуумного газойля; - сырья установки ГОВГ; - компонента топлива судового маловязкого; - компонента топлива бункеровочного легкого	1. Фракционный состав, °С - 50% перегоняется при температуре, не выше - 96% перегоняется при температуре, не выше - температура КК, не выше - для сырья установок Л-24/7, ЛЧ-24/2000, 96% перегоняется при температуре, не выше	335 360 не нормируется 340
		2. Содержание воды и механических примесей	отсутствие
		3. Определение цвета	светлый
		4. Плотность при 15 °С, кг/м ³	не нормируется
		5. Температура вспышки в закрытом тигле, °С, не ниже	60

Продолжение таблицы 11

Первый вакуумный погон	Используется в качестве: - компонента вакуумного газойля; - компонента топочного мазута; - компонента жидкого топлива	1. Вязкость кинематическая при 100 ⁰ С, мм ² /с (сСт)	не нормируется, определение обязательно
	- сырья установки гидроочистки вакуумного газойля; - сырья установки каталитического крекинга-2	1. Фракционный состав: - начало кипения, °С -5 % выкипает при температуре, °С -95 % выкипает при температуре, °С - конец кипения, °С	не нормируется, определение обязательно
Средневязкий вакуумный погон	Используется в качестве: - сырья установок селективной очистки масел №37/2,4,5	1. Вязкость кинематическая при 100 ⁰ С, мм ² /с (сСт) 2. Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже 3. Цвет на колориметре ЦНТ, ед. ЦНТ, не более 4. Фракционный состав: -НК, °С, не ниже -5% выкипает при температуре, °С, не ниже -95% выкипает при температуре, °С, не выше 5. Плотность при 15 °С, кг/м ³	5,4 - 5,9 205 2,5 375 385 440 не нормируется
	- компонента вакуумного газойля; - сырья установки гидроочистки вакуумного газойля; - компонента сырья для производства кровельных битумов; - компонента топочного мазута	1. Вязкость кинематическая при 100 ⁰ С, мм ² /с (сСт)	не нормируется
	- сырья установки каталитического крекинга-2	1. Цвет на колориметре ЦНТ, ед. ЦНТ, не более 2. Фракционный состав: - начало кипения, °С -5% выкипает при температуре, °С -95% выкипает при температуре, °С - конец кипения, °С	2,0 не нормируется

Продолжение таблицы 11

Вязкий вакуумный погон	Используется в качестве: - сырья установок селективной очистки масел №37/2,4,5	1. Вязкость кинематическая при 100 ⁰ С, мм ² /с (сСт) 2. Температура вспышки в открытом тигле, ⁰ С, не ниже 3. Цвет на колориметре ЦНТ, ед. ЦНТ, не более 4. Фракционный состав: -5% выкипает при температуре, ⁰ С, не ниже -95% выкипает при температуре, ⁰ С, не выше 5. Плотность при 15 °С, кг/м ³	9,4 – 9,9 220 4,5 425 480 не нормируется
	- компонента вакуумного газойля; - сырья установки гидроочистки вакуумного газойля; - сырья установки 19/6 для получения окисленного битума; - компонента сырья для производства кровельных битумов; - компонента топочного мазута; -сырья каталитического крекинга-2	1. Вязкость кинематическая при 100 ⁰ С, мм ² /с (сСт)	не нормируется
Высоковязкий вакуумный погон	Используется в качестве: - компонента вакуумного газойля; - сырья установки гидроочистки вакуумного газойля; - компонента мазута	1. Плотность при 15 °С, кг/м ³ 2. Вязкость кинемати-ческая при 100 ⁰ С, мм ² /с (сСт), не ниже 3. Температура вспышки в открытом тигле, ⁰ С, не ниже 4. Цвет на колориметре ЦНТ, ед. ЦНТ, не более 5. Фракционный состав: -95% выкипает при температуре, ⁰ С, не выше	не нормируется 14 255 6,0 550

Продолжение таблицы 11

Фракция вакуумного гудрона	Используется в качестве: - сырья установки деасфальтизации №36/1; - сырья для производства битума; сырья для производства мастики МБР; - компонента мазута топочного; - компонента товарного гудрона; - сырья установки висбрекинга гудрона	1. Вязкость кинематическая при 100 ⁰ С, мм ² /с , не более 2. Температура вспышки в закрытом тигле, ⁰ С, не ниже 3. Выкипаемость до 500 ⁰ С, %, не более 4. Плотность при 15 ⁰ С, кг/м ³ 5. Массовая доля углеродных остатков, % 6. Содержание Na, ppm масс., не более	не нормируется 220 10 не нормируется 15-18 18
Компонент Вакуумного газойля	Используется в качестве: - сырья установки гидроочистки вакуумного газойля с блоком каталитического риформинга серосодержащих газов; - компонента мазута топочного; - компонента вакуумного газойля - сырья установки каталитического крекинга-2	1. Плотность при 15 °С, кг/м ³ 2. Температура вспышки в закрытом тигле, °С, не ниже 3. Фракционный состав, ⁰ С НК, не ниже КК, не выше 4. Вязкость кинематическая при 100 ⁰ С, мм ² /с (сСт) 5. Массовая доля серы, %, не более 6. Массовая доля азота, мг/кг, не более 7. Массовая доля никеля, мг/кг, не более 8. Массовая доля ванадия, мг/кг, не более 9. Массовая доля углеродного остатка, %	не нормируется 80 343 570 не нормируется, 2,3 1680 0,2 0,8 не нормируется

Таким образом, на предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» успешно реализована глубокая переработка мазута, которая осуществляется на установке ВТ-2. Полученные продукты широко используются на других этапах производства в качестве сырья или его компонента, что в очередной раз доказывает эффективность внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий.

Заключение

Произведена модернизация печи нагрева мазута установки ВТ-2 для переработки мазута во вторичные продукты.

Проанализирована технология производства получения вторичного сырья из мазута на установке вакуумной трубчатки ВТ-2 нефтеперерабатывающего завода ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез». Представлена технологическая схема установки, изучены основные этапы процесса, характеристика исходного сырья и получаемых продуктов.

Рассмотрены основные виды трубчатых печей, их конструкции и принципы работы. Произведен сравнительный анализ их основных технических характеристик: самой низкой теплопроизводительностью обладают цилиндрические печи типа ЦС, а самой высокой - узкокамерные горизонтальные печи со свободным факелом горения и многокамерные трубчатые печи типа Р. Наиболее высокие значения теплонапряженности радиантных труб отмечено у шатровых двухкамерных печей.

Проанализированы типы горелочных устройств в печах. Применение комбинированных горелочных устройств на современном производстве является наиболее целесообразным и высокоэффективным.

Произведен технологический расчет печи. Рассчитан процесс горения газообразного топлива в трубчатой печи. Определен элементарный состав продуктов сгорания, суммарная удельная теплота сгорания топлива и удельная энтальпия. Составлен тепловой баланс трубчатой печи. Рассчитаны коэффициенты полезного действия печи и топки, а также расход топливного газа.

По полученным данным по каталогу подобрана подходящая трубчатая печь на комбинированном топливе типа АП-КСГ-38,55. Рассмотрены ее основные технические характеристики и схема конструкции.

Произведен расчет камеры радиации печи. Определена температура образованных газов в процессе сгорания топлива ($T=1140^{\circ}\text{K}$), рассчитана теплонапряженность поверхности труб радиации. Рассчитан диаметр печных труб ($d_{\text{вн}} = 0,152 \text{ м}$).

Произведен расчет камеры конвекции. Определены коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи конвективной камеры для участков с гладкими, оребренными и ошипованными трубами. Произведен сравнительный анализ полученных тепловых характеристик.

В качестве модернизации трубчатой печи для нагрева мазута и его дальнейшую переработку во вторичное сырье предложено заменить участок оребренных труб на ошипованные. Это позволит повысить площадь теплообмена, увеличить коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, а следовательно и эффективность работы камеры конвекции. Кроме того, использование ошипованных труб снизит потери с дымовыми газами и приведет к экономии используемого топлива.

Список используемых источников

1. Каминский Э.Ф. Глубокая переработка нефти: технологический и экологический аспекты / Э.Ф. Каминский, В.А. Хавкин. - М.: Техника, 2016. 384 с.
2. Танатаров М.А., Ахметшина М.Н. Технологические расчеты установок переработки нефти: учебное пособие. – Москва : Химия, 1987. 352 с.
3. Sater Nabil Abdul; Grigorov Andrey Ways of improving the equipment for primary petroleum refining // Petroleum & Coal. 2019. Vol. 61 Issue 2, p390-394. 5p
4. Морозов В.А., Отрошко Т.П. Современная установка вакуумной перегонки мазута // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2016. № 10. С. 51-58.
5. Волосов И.В., Леденев С.М. Анализ работы установки первичной переработки нефти // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 6-2. С. 217-218.
6. Остриков В.В. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости : учебное пособие. – Москва; Вологда : Инфа-Инженерия, 2019. 244 с.
7. ТР 07-114-2019 Технологический регламент установки ВТ-2 комплекса технологических установок первичной переработки сернистой нефти (АВТ-1, АВТ-2 и ВТ-2) ПМТ // ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез». 2019. 337 с.
8. Жидков А.Б. Трубчатые нагревательные печи нефтепереработки и нефтехимии. СПб. : Артпроект, 2015. 104 с.
9. Казеннов А.А., Филатов Г.В., Сазонов В.Н., Рожков А.Б. Трубчатые печи. Каталог. издание 7-е, исправленное и дополненное. М. : 2007.

10. Катин В.Д., Березуцкий А. Ю. Новая конструкция малотоксичной горелки для совместного и отдельного сжигания газа и мазута в трубчатых печах // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2016. № 12. С. 46-48
11. Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г. Горелочные устройства промышленных печей и топок. Конструкции и технические характеристики. М.: «Интермет Инжиниринг», 1999 - 560 с.
12. Березуцкий А.Ю. Новая конструкция горелки для эффективного сжигания газа и мазута в нефтезаводских печах. // Материалы Всероссийской с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. С. 57-60.
13. Катин В.Д., Березуцкий А.Ю. Комплексные экологические исследования горелочных устройств трубчатых печей и разработка новой конструкции горелки типа ГП // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2015. — № 7. С. 46-48
14. Катин В.Д., Булгаков С.В. Технические решения и рекомендации по выбору эффективных горелочных устройств и их рациональной компоновки для трубчатых печей нефтеперерабатывающих заводов // Безопасность жизнедеятельности. 2019. № 5 (221). С. 45-49.
15. Адельсон С.В. Процессы и аппараты нефтепереработки и нефтехимии. М.: Гостоптехиздат, 1963. 311 с.
16. Эмирджанов Р.Т. Основы расчета нефтезаводских процессов и аппаратов. Баку: Азнефтеиздат, 1956. 420 с.
17. Ягудин М.Н. Тепловой и аэродинамический расчет трубчатых печей. Уфа : Издательство ГУП ИНХП РБ, 2008. 210 с.
18. Чигаркина О.А. Ресурсоэффективное использование углеводородного сырья как основа реализации концепции «зеленой» экономики // Экономика: стратегия и практика. 2017. № 3 (43). С. 100-110.

19. Голик В.И., Дольников Е.Б. Специальные способы разработки месторождений полезных ископаемых : учебник. – Москва; Вологда : Издательство московский государственный горный университет, 2008. 331 с.
20. Кузеев И.Р., Тукаева Р.Б. Основное оборудование технологических установок НПЗ: учебное пособие. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2013. 129 с.
21. Валитов Ш.М., Азимов Ю.И. Современные системные технологии в отраслях экономики: учебное пособие. – Москва : Проспект, 2015. 500 с.
22. Атанов Е.А. Исследование теплообмена в ошипованных поверхностях печи подогрева товарной нефти. // Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Материалы научно-практической конференции. — Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2017. С. 104.
23. Grubler Arnulf Energy transitions research insights and cautionary tales. // Energy Policy. 2012. Vol. 50. P. 8-18.
24. Matthias J. Pickl The renewable energy strategies of oil majors – From oil to energy? // Energy Strategy Reviews. 2019. Vol. 26. Article 100370.
25. Duncan Leeson, Paul Fennell A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries. // Energy Procedia. 2017. Vol. 114. P. 6297-6302.
26. Benjamin K. Sovacool How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. // Energy Research & Social Science. 2016. Vol. 13. P. 202-215.
27. Калинина Т.А. Химия нефти и газа : учебно-методический комплекс. – Москва : Проспект, 2019. 189 с.
28. Бобрицкий Н.В., Юфин В.А. Основы нефтяной и газовой промышленности: учебное пособие. – Москва : Недра, 1988. 200 с.