

11.1
Д 47

ВЫСШАЯ ШКОЛА МВД СССР

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

М. В. АЛЕКСЕЕВ

ПРОЦЕССЫ НАГРЕВА

ЦИКЛ ЛЕКЦИЙ

ПО ПОЖАРНОЙ ПРОФИЛАКТИКЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Москва

1959

ВЫСШАЯ ШКОЛА МВД СССР

ФАКУЛЬТЕТ ИНЖЕНЕРОВ
ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ТЕХНИКИ И БЕЗОПАСНОСТИ

П.1
А47

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

М. В. АЛЕКСЕЕВ,
ИНЖЕНЕР-ПОЛКОВНИК

ПРОЦЕССЫ НАГРЕВА

ЦИКЛ ЛЕКЦИЙ

ПО ПОЖАРНОЙ ПРОФИЛАКТИКЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

9622/67бр.

БИБЛИОТЕКА
ФИПТ и Б ВШ
БРОШЮРНЫЙ ФОНД

Москва

1959

В цикле лекций «Процессы нагрева» дано краткое описание широко применяющихся и пожароопасных способов нагрева веществ, устройства и работы приборов обогрева, элементов расчета подогревателей, пожарной опасности при их работе, а также пожарно-профилактических мероприятий.

Объем материала соответствует учебной программе факультета инженеров противопожарной техники и безопасности Высшей школы МВД.

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ НАГРЕВА. ТЕПЛОНОСИТЕЛИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ НАГРЕВАНИЯ

Процессы нагрева являются одними из наиболее распространенных в химической и механической технологии.

Нагревание необходимо для ускорения многих химических реакций (например, при получении аммиака, пластических масс, синтетического каучука), для осуществления физических процессов выпаривания, перегонки, сушки, снижения вязкости и т. д., а также при получении металлов из руд, при литье металлических изделий, горячей и термической обработке металлов.

Тепловая энергия, необходимая для проведения тех или иных технологических процессов, может быть получена различными способами и от различных источников. С развитием техники появляются новые источники тепла, а также новые способы нагревания.

Источники тепла, используемые для обогрева, называются теплоносителями. В технике наиболее часто используются следующие теплоносители:

дымовые (топочные) газы и пламя, образующиеся при сжигании топлива;

электрическая энергия, преобразуемая в тепловую;

водяной пар или горячая вода;

воздух;

специальные теплоносители: минеральные масла, высококипящие жидкости и их пары, расплавленные неорганические соли, расплавленные металлы.

Для целей нагревания веществ в условиях производства очень часто используют отходящие газы и жидкости, обладающие относительно высокой температурой (например, мазут, гудрон и др. горячие продукты перегонки в нефтяной промышленности; горячие газы доменного и коксохимического производства).

Большую будущность, как источник нагрева, имеет атомная энергия.

Важнейшими условиями, от которых зависит выбор теплоносителя, являются:

1. Температура нагрева продукта и возможность ее регулирования, а также количество передаваемого тепла, определяемые технологическими требованиями.

2. Безопасность осуществления процесса нагрева.

3. Простота конструктивного устройства нагревательных приборов, их невысокая стоимость.

4. Отсутствие токсичности и химической активности теплоносителя по отношению к материалу аппаратов и нагреваемым веществам.

Возможность достижения широкого диапазона рабочих температур, легкость их регулирования и экономические соображения привели к широкой распространенности методов обогрева водяным насыщенным паром и горячей водой, пламенем и дымовыми топочными газами, специальными теплоносителями и электрическим током.

Пожарная опасность производственных установок по нагреву веществ определяется многими факторами, в том числе и пожароопасными свойствами самих теплоносителей.

Если не учитывать конструктивных особенностей нагревательных аппаратов, то наиболее существенными факторами, определяющими пожарную опасность данной системы обогрева, будут величина рабочей температуры теплоносителей и их горючесть.

Это можно пояснить следующими рассуждениями.

Все горючие вещества, применяемые в качестве промежуточных теплоносителей (масло, дифенильные смеси, нафталин и др.) или используемые в качестве топлива (жидкие, газообразные и твердые вещества), при определенных условиях сами могут образовывать горючую, а иногда и взрывоопасную среду как в производственном помещении, так и в нагревательных аппаратах.

Некоторые теплоносители имеют высокую температуру и в определенных условиях могут стать источником воспламенения горючих веществ, которые нагреваются или расположены вблизи от нагревательных аппаратов.

Если по каким-либо причинам нагреваемое вещество образовало горючую среду, но температура теплоносителя ниже ее температуры самовоспламенения, то в этом случае можно ожидать возможности воспламенения горючей смеси только от посторонних источников тепла, а не от теплоносителя.

Если температура теплоносителя будет выше температуры самовоспламенения соприкасающегося с ним горючего вещества, то неизбежно произойдет воспламенение этого вещества.

Наиболее опасным является обогрев пламенем и дымовыми топочными газами. При этом способе вещество может нагреваться до 1000° , а температура самого теплоносителя достигать $1200-1400^{\circ}$. Такая температура значительно превышает температуру самовоспламенения всех горючих веществ.

Предварительно нагретые жидкости (специальные высокотемпературные теплоносители) обычно дают возможность нагревать продукт до температуры 300—350°. Максимальная температура самих теплоносителей не превышает 350—400° и всегда меньше их температуры самовоспламенения. Следовательно, специальные высокотемпературные теплоносители чаще всего представляют опасность как источники образования горючей среды и реже как источники воспламенения нагреваемых или рядом находящихся горючих веществ.

Расплавленные соли дают возможность производить нагрев веществ до температуры порядка 600°. В качестве теплоносителей очень часто используются селитры. Расплавленные соли, сочетающие высокую рабочую температуру с сильными окислительными свойствами, наиболее опасны как возможные источники воспламенения нагреваемых или рядом находящихся горючих веществ.

Наиболее универсальным, современным и быстро развивающимся методом обогрева является обогрев электрическим током. Системы обогрева электрическим током дают возможность достигать практически любых температур и обеспечивать необходимую плавность обогрева. В связи с бурным ростом строительства тепловых электростанций, гидроэлектростанций, а также атомных электростанций использование электроэнергии для промышленных нагревательных установок будет неуклонно возрастать¹. Пожарная опасность таких установок характеризуется тем, что количество энергии и температура могут быть достаточными для воспламенения любого горючего вещества.

Наиболее безопасным в пожарном отношении и широко применяемым в промышленности является обогрев водяным паром, водой и воздухом. Низкие температуры нагрева и негорючесть этих теплоносителей обеспечивают сравнительную безопасность указанных способов обогрева.

Рассмотрим наиболее часто применяющиеся в промышленности способы обогрева и их аппаратуру.

¹ Подробно о способах нагрева электрическим током и их пожарной опасности излагается в курсе пожарной профилактики в электроустановках.

Глава II

НАГРЕВАНИЕ ВОДЯНЫМ ПАРОМ И ГОРЯЧЕЙ ВОДОЙ

Способ нагрева продуктов водяным паром является одним из самых распространенных и наиболее удобных в производственном отношении методов. Для обогрева применяют обычно насыщенный водяной пар, а не перегретый. Насыщенный водяной пар, конденсируясь, отдает теплоту испарения, то есть то количество тепла, которое было затрачено на испарение воды ($539,4 \text{ ккал/кг}$).

Перегретый пар в теплообменных аппаратах ведет себя как газ, он охлаждается, не конденсируясь. Теплоемкость водяных паров при температуре от 100° до 200° изменяется в пределах от $0,45$ до $0,46 \text{ ккал/кг град}$. При охлаждении одного килограмма паров воды на один градус выделяется примерно $0,455 \text{ ккал}$, а при охлаждении на 100° всего 45 ккал . Это справедливо до тех пор, пока перегретый пар в результате охлаждения не превратится в насыщенный водяной пар.

Отсюда видно, что при использовании перегретого водяного пара в качестве теплоносителя расходуется большое количество пара, а также материала на производственную аппаратуру. Кроме того, намного увеличиваются теплотери в окружающую среду.

Установки, в которых насыщенный пар применяется как теплоноситель, всегда компактны и просты по устройству.

В зависимости от величины давления различают водяной пар давлением до 4 атм и пар давлением до 15 атм . Используя водяной пар давлением до 4 атм , можно нагревать вещества примерно до 120° , а пар давлением до 15 атм дает возможность нагревать вещества до 180° . Нагревание выше 180° путем использования водяного пара не рационально, так как большие давления пара при этом требуют специальной громоздкой аппаратуры.

Изменения давления и температуры насыщенного водяного пара видны из таблицы 1.

Обогрев водяным паром может осуществляться путем непосредственной подачи пара в обогреваемую жидкость или путем передачи тепла от пара к жидкости, газу или твердым телам через разделяющую их стенку.

Таблица 1

Давление ата	Темпера- тура °С	Давление ата	Темпера- тура °С	Давление ата	Темпера- тура °С	Давление ата	Темпера- тура °С
1	100	8	170	20	211	90	302
2	120	9	174	30	233	100	300
3	133	10	178	40	249	120	323
4	143	12	187	50	263	140	335
5	151	14	194	60	274	200	364
6	158	16	200	70	284		
7	164	18	206	80	294		

Пар, непосредственно вводимый в обогреваемую жидкость, называется острым паром, а аппараты подобного типа — смесительными. Пар, от которого тепло к нагреваемому продукту передается через стенку, называется глухим паром, а сами аппараты — рекуперативными.

Нагрев острым паром

Нагрев острым паром применяется для воды и водяных растворов, а также в том случае, когда одновременно с нагревом требуется производить перемешивание жидкостей. При этом выпускаемый в аппарат острый пар отдает свое тепло нагреваемой жидкости и конденсируется, а конденсат смешивается с жидкостью.

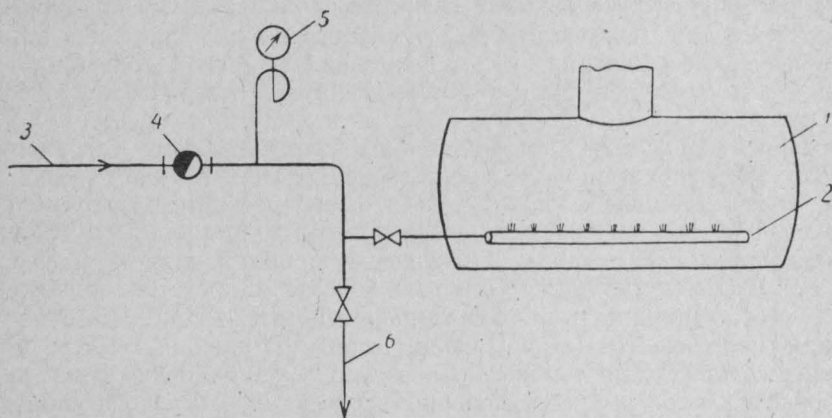


Рис. 1. Обогрев аппарата острым паром:

1—емкость; 2—барботер; 3—паровая линия; 4—обратный клапан; 5—манометр; 6— линия для спуска конденсата.

Простейший аппарат для обогрева жидкостей острым паром состоит из системы перфорированных труб, к которым подводится пар из котельной. Такие трубы называются барботером. При этом способе обогрева могут быть случаи повреждения закрытых аппаратов в результате неправильного оборудования паровых линий или несоблюдения установленного режима. Поэтому на паровой линии

необходимо иметь манометры, а также автоматические регуляторы подачи пара.

Если по каким-либо причинам давление водяного пара будет меньше внутреннего давления в аппарате, то содержимое подогревателя может быть передавлено в паровую линию, а из нее в паровой котел. Допустим, что рабочее давление в аппарате 4 атм, а пар поступает из котельной под давлением 5 атм. При уменьшении давления пара до 2 атм жидкость будет поступать в паровую трубу. Для устранения возможности попадания нагреваемой жидкости в паровую линию на ней устанавливают обратный клапан. Для устранения возможности попадания конденсата водяного пара в нагреваемую жидкость паровые линии иногда оборудуются приспособлением для отвода конденсата перед пуском пара в аппарат.

Оборудование паровой линии при обогреве острым паром видно из рис. 1.

Нагрев глухим паром

Если по технологическим соображениям нельзя применять обогрев острым паром, то применяют обогрев глухим паром, при помощи рекуперативных подогревателей.

Подогреватели для обогрева глухим паром имеют различной формы теплообменную поверхность, то есть поверхность стенки, через которую передается тепло от теплоносителя к нагреваемому веществу. Теплообменная поверхность паровых подогревателей бывает в виде паровых рубашек (подогреватели с паровой рубашкой), змеевиков (змеевиковые теплообменники), трубочек небольшого диаметра (кожухотрубные теплообменники), спиралей (спиральные теплообменники) и т. п. Нагревание паром низкого давления позволяет применять теплообменную поверхность любой формы.

При конденсации пара на стенках нагревательного устройства образуется непрерывно стекающая вниз водяная пленка. Температура одной стороны пленки равна температуре пара, а другой — температуре стенки. Так как пленка тонкая, то температура стенки, соприкасающейся с паром, практически приближается к температуре пара. Поэтому температуру конденсата с достаточной точностью можно принимать равной температуре пара. При таком допущении передача тепла происходит при постоянной температуре теплоносителя и для теплообмена взаимное направление движения жидкости и пара не имеет значения. Пар в теплообменные аппараты подводят всегда сверху для того, чтобы конденсат мог свободно стекать вниз и беспрепятственно удаляться из аппарата. Рассмотрим конструктивное устройство некоторых стационарных теплообменных аппаратов.

Подогреватели с паровой рубашкой. Двойные стенки, образуемые корпусом аппарата и паровой рубашкой, широко используются для обогрева реакционных аппаратов, особенно в тех случаях, когда внутри их нельзя установить змеевиков (например, в аппаратах со скребковыми мешалками и др.). Обычно рубашки применяют для нагревания паром давлением не более 5 атм, так как пре-

вышение этого предела приводит к чрезмерному утолщению стенок. Поверхность рубашки, как правило, не превышает 10 м^2 , а высота должна быть не менее высоты уровня жидкости в аппарате. Для более равномерного обогрева аппаратов диаметром более 1 м пар вводят в рубашку с двух противоположных сторон.

Схема устройства аппарата с рубашкой показана на рис. 2.

При использовании данного аппарата как холодильника в нижний штуцер вводят охлаждающую жидкость, а из верхних отводят ее.

Змеевиковые теплообменники. Одним из простейших теплообменных устройств в аппаратах являются змеевики. Змеевики могут быть выполнены в виде спирально согнутой трубы с расположением витков по винтовой линии или в виде прямых труб, соединенных коленами, как показано на рис. 3.

Коэффициент теплоотдачи при наличии змеевиков несколько выше, чем у прямых труб. Однако змеевики имеют большую длину и при конденсации пара в нижней части змеевика накапливается толстая пленка конденсата, что приводит к ухудше-

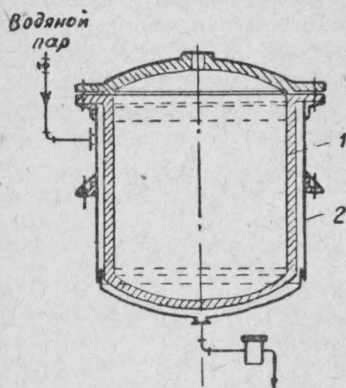


Рис. 2. Подогреватель с паровой рубашкой:

1—корпус аппарата; 2—стенка рубашки.

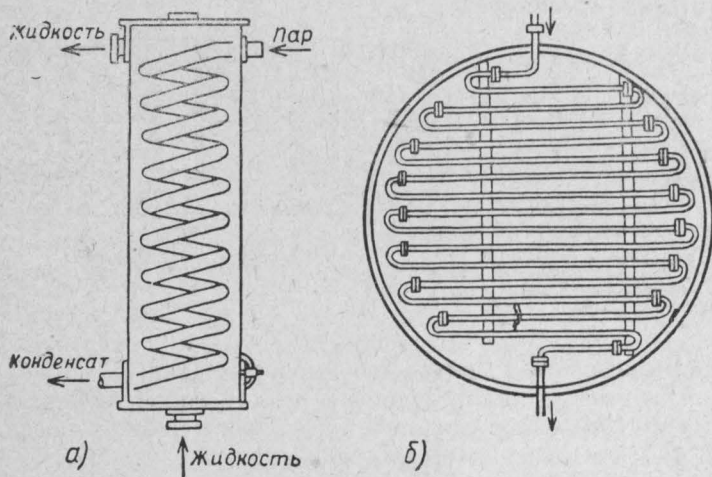


Рис. 3. Змеевиковые подогреватели:

а) змеевик спиральный; б) плоский змеевик.

нию теплообмена. Кроме того, в длинных змеевиках значительно уменьшается давление и затруднен отвод конденсата и неконденсирующихся газов. Поэтому длинные змеевики разделяют на несколько отдельных параллельных секций, расположенных одна над дру-

гой или в виде концентрических окружностей. Змеевики обычно выполняются из труб диаметром до 76 мм.

Теплообменники из змеевиков, погруженных в резервуар, наполненный жидкостью, называются погружными или погруженными. Вследствие небольшой скорости протекания жидкости в резервуаре эти теплообменники отличаются малоинтенсивным массообменом, но их часто применяют для охлаждения из-за простоты изготовления и ремонта.

В змеевиковых теплообменниках одна из жидкостей может орошать трубы змеевика снаружи. Такие устройства применяются в качестве холодильников и называются оросительными.

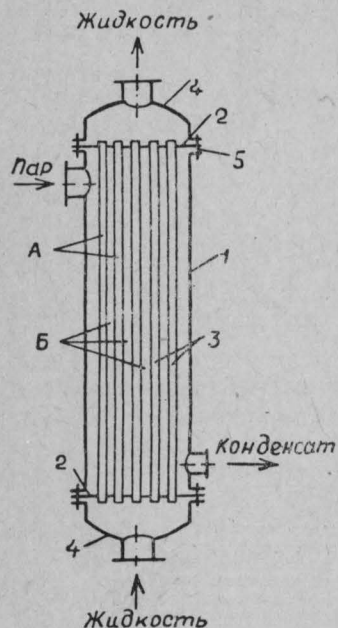


Рис. 4. Кожухотрубный теплообменник:

1—кожух; 2—трубные решетки; 3—трубки; 4—крышки; 5—болты; А—трубное пространство; Б—межтрубное пространство.

Кожухотрубные (трубчатые) теплообменники применяются в тех случаях, когда требуется большая поверхность нагрева, так как применение аппаратов с паровыми рубашками и змеевиками в этом случае нецелесообразно. Рубашки обладают небольшой поверхностью обогрева, а змеевики дают большие потери в давлении пара и затрудняют быстрое удаление конденсата.

Кожухотрубный теплообменник (рис. 4) состоит из металлического кожуха

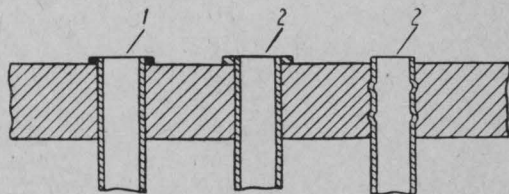


Рис. 5. Соединение трубок с трубной решеткой:

1—сварка; 2—развальцовка.

ха 1, внутри которого крепятся два дырчатых днища 2 (трубные решетки). Трубные решетки соединены между собой пучком труб 3. Трубки герметично закрепляются в трубных решетках развальцовкой, сваркой или сальниковыми соединениями (рис. 5).

В теплообменнике получают два самостоятельных объема — трубный и межтрубный. Пар пускают в межтрубное пространство, а жидкость — по трубкам, или наоборот. Теплообменники располагаются вертикально или горизонтально. Недостатком вертикальных подогревателей является образование относительно толстой пленки конденсата внизу теплообменных трубок, что понижает коэффициент теплопередачи от греющего пара к обогреваемому продукту.

Кожухотрубные теплообменники бывают одноходовыми, когда теплоноситель движется параллельно по всем трубам, и многоходовыми, когда пучок труб разделен на несколько секций (ходов), причем теплоноситель проходит последовательно по всем ходам. Такое устройство позволяет увеличить скорость теплоносителя в трубах теплообменника и, следовательно, улучшить теплопередачу. Обычно скорость теплоносителя принимают равной 0,25—2 м/сек.

Спиральные теплообменники по сравнению с другими обеспечивают лучший теплообмен. В них поверхность теплообмена образуется двумя металлическими листами, свернутыми в виде спирали. По одному спиральному каналу движется теплоноситель, а по другому — нагреваемая жидкость. Работа спирального теплообменника ничем не отличается от рассмотренных выше подогревателей. Сложность изготовления спиральных теплообменников ограничивает их широкое применение в промышленности.

Для обогрева цистерн и емкостей с вязкими жидкостями перед их сливом весьма часто применяются переносные (нестационарные) паровые и водяные теплообменники.

Нестационарные теплообменники. Существует несколько конструкций переносных подогревателей. В настоящее время находят применение подогреватели системы Гластоцкого (рис. 6), системы

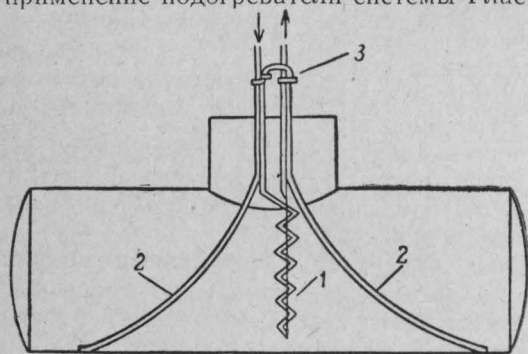


Рис. 6. Подогреватель системы Гластоцкого:
1—центральная секция; 2—боковые секции; 3—соединительные шланги.

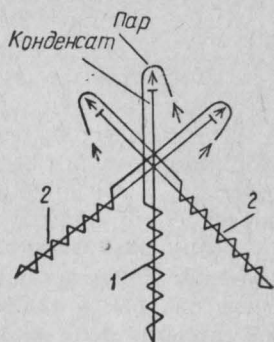


Рис. 7. Подогреватель системы Чекмарева:
1—центральная секция; 2—боковые секции.

Чекмарева (рис. 7), системы Медведева и др. Принцип работы всех этих систем одинаков: по одной линии подается водяной пар с давлением около 3 атм или горячая вода, а по другой — отводится конденсат или охладившаяся вода. От горячих стенок грелки нагревается жидкость, находящаяся в цистерне.

Все вышеуказанные системы малопроизводительны, тяжелы, громоздки и имеют небольшой коэффициент полезного действия.

Расчет паровых подогревателей

При расчете паровых подогревателей определяют необходимое количество греющего пара и требуемую величину теплообменной

поверхности. Количество нагреваемой жидкости, ее начальная и конечная температуры, а также параметры греющего пара бывают обычно заданными.

Необходимое для нагревания веществ количество сухого греющего пара определяется из уравнения теплового баланса, то есть количество тепла, поступающего в теплообменник с теплоносителем и нагреваемым веществом, должно быть равно количеству тепла, содержащегося в теплоносителе и нагреваемом веществе при выходе из теплообменника.

Если считать, что весь пар конденсируется, то уравнение теплового баланса будет выражено следующим образом:

$$Di + Gct_n = Dit_{кд} + Gct_k + Q_{пот}.$$

Отсюда

$$D = \frac{Gc(t_k - t_n) + Q_{пот}}{i - it_{кд}} \text{ кг/час},$$

где: D — расход греющего пара в кг/час;

i — теплосодержание пара в ккал/кг;

$Q_{пот}$ — потери тепла аппаратом в окружающую среду в ккал/час;

$t_{кд}$ — температура конденсата;

G — количество нагреваемой жидкости в кг/час;

c — теплоемкость жидкости в ккал/кг°C;

t_n — начальная температура жидкости в °C;

t_k — конечная температура жидкости в °C.

Потери тепла в окружающую среду $Q_{пот}$ определяются по общим формулам теплопередачи исходя из температуры стенки и воздуха, а при приближенных расчетах принимаются примерно равными 5% от общего количества тепла.

При расчете теплообменных аппаратов с рубашками обычно заданы количество нагреваемой жидкости, ее начальная и конечная температуры, а также поверхность нагревательной рубашки. Определяемыми величинами являются коэффициент теплопередачи от пара и жидкости и время обогрева.

Время обогрева можно определить по следующей формуле:

$$\tau = \frac{Q}{KF\Delta t_{ср}} \text{ час},$$

где: Q — количество тепла, необходимое для нагревания жидкости и возмещения тепловых потерь в ккал;

F — поверхность теплообмена в м²;

K — коэффициент теплопередачи от конденсирующегося пара к нагреваемой жидкости в ккал/м² час град;

$\Delta t_{ср}$ — средняя разность температур между теплоносителем и нагреваемой жидкостью в °C.

Коэффициент теплопередачи K от конденсирующегося пара и жидкости определяется по общим законам теплопередачи. За поверхность теплообмена принимают внутреннюю поверхность аппа-

рата, погруженную в нагреваемую (или охлаждаемую) жидкость:

$$F = \pi d h_1 + 2\pi R h_2,$$

где: d — внутренний диаметр аппарата в m ;

R — радиус кривизны днища в m ;

h_1 — высота цилиндрической части аппарата, заполненной жидкостью, в m ;

h_2 — высота сферической части днища в m .

При расчете змеевиковых подогревателей поверхность змеевика находят по общему уравнению теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{cp} \tau} m^2.$$

После этого определяют его конструктивные размеры: общую длину, высоту и число витков.

При давлении пара 3—5 atm рекомендуется выбирать отношение длины змеевика к диаметру его труб в пределах 225—275 (при средней разности температур теплоносителей в пределах $\Delta t_{cp} = 30—40^\circ$).

Вследствие значительного гидравлического сопротивления змеевиков скорость теплоносителей в них принимают обычно меньшей, чем в прямых трубах, скорость жидкости — 1 m/sec , а весовую скорость газов — до 10 $kg/m^2 sec$.

Для круглого змеевика выбирают диаметр витка змеевика $d_{зм}$ и расстояние между витками по вертикали, или шаг по вертикали h , который принимают равным 1,5—2 диаметрам трубы змеевика.

Длина одного витка змеевика, как винтовой линии, равна:

$$l = \sqrt{(\pi d_{зм})^2 + h^2} \approx \pi d_{зм}.$$

Общая длина змеевика при числе его витков « n » составляет:

$$L = nl = n\pi d_{зм},$$

следовательно, $n = \frac{L}{\pi d_{зм}}$ с округлением до целого числа.

Общая высота змеевика (по осям крайних труб):

$$H = nh.$$

Зная расход нагреваемой жидкости V $сек$ и принимая скорость ее протекания через змеевик v , определяют число параллельных секций:

$$m = \frac{4V_{сек}}{\pi d^2 v}, \text{ откуда длина одной секции:}$$

$$L_0 = \frac{L}{m} m.$$

При расчете кожухотрубных теплообменников обычно задаются определенной скоростью теплоносителя и диаметром труб. После этого находят коэффициент теплопередачи K и величину поверхности нагрева F теплообменника по общему уравнению теплопередачи:

$$Q = KF \Delta t_{cp} \tau \text{ ккал.}$$

Количество тепла, потребное для нагревания жидкости, определяют по формуле:

$$Q = Gc(t_k - t_n).$$

Теплоемкость C определяется по таблицам для средней температуры нагрева.

Коэффициент теплопередачи K от теплоносителя к нагреваемой жидкости определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час град},$$

где: α_1 — коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке $\text{ккал/м}^2 \text{ час град}$;

α_2 — коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой жидкости в $\text{ккал/м}^2 \text{ час град}$;

δ — толщина теплообменной поверхности в м;

λ — теплопроводность теплообменной поверхности в ккал/м час град .

Коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара в стенке в общем виде выражается следующим уравнением:

$$Nu = f(Ca, Pr, K),$$

где: $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ — критерий Нуссельта;

$Ca = \frac{gl^3}{\nu}$ — критерий Галилея (ν — коэффициент кинематической вязкости);

$Pr = \frac{3600\mu gc}{\lambda}$ — критерий Прандтля (μ — вязкость в кг сек/м^2);

$K = \frac{r}{c \Delta t}$ — критерий конденсации (r — теплота конденсации в ккал/кг).

Все физические константы, характеризующие состояние конденсата, берутся при его средней температуре.

С. С. Кутателадзе раскрыл опытным путем характер этой функции и нашел, что коэффициент теплоотдачи α_1 , для вертикального пучка труб может быть определен:

$$\alpha_1 = 1,15 \frac{3600\lambda^3 \gamma^2 r}{n(t_{кл} - t_{ст})\mu} \text{ ккал/м}^2 \text{ час град},$$

где: λ, γ, μ — теплопроводность, удельный вес и вязкость конденсата, определяемые при средней температуре пограничной пленки $t_{cp} = 0,5(t_{кл} - t_{ст})$.

Коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося водяного пара к стенке весьма велик и колеблется в пределах от 5000 до 15 000 $\text{ккал/м}^2 \text{ час град}$.

Весьма часто при поверочных расчетах величину α_1 от конденсирующегося пара принимают равной 10 000 $\text{ккал/м}^2 \text{ час град}$.

Коэффициент теплоотдачи от теплообменной поверхности к турбулентному потоку жидкости и газа в общем виде выражается следующей зависимостью:

$$Nu = f\left(Re; Pr; \frac{l}{l_0}\right).$$

При раскрытии этой взаимозависимости наиболее надежные результаты дает следующая формула, применимая как для капельных жидкостей, так и для газов:

$$Nu_f = 0,021 Pe_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}.$$

Индекс « f » указывает на то, что физические величины, характеризующие состояние жидкости, берутся при ее средней температуре; индекс « w » — что физические величины берутся при средней температуре стенки. Отношение критериев Прандтля практически можно принять равными единице, тогда получим:

$$\alpha_2 = 0,021 \frac{\lambda}{d} Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}$$

$$\alpha_2 = 0,021 \frac{\lambda}{d} \left(\frac{vd}{\nu}\right)^{0,8} \left(\frac{3600\mu_{gc}}{\lambda}\right)^{0,43} \text{ ккал/м}^2 \text{ час град},$$

где: λ — коэффициент теплопроводности нагреваемой жидкости, $\text{ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}$;

d — диаметр трубки в м.

Значение физических параметров принимается при средней температуре жидкости.

Температурный напор или средняя логарифмическая разность температур (Δt_{cp}) между теплоносителем и нагреваемой жидкостью определяется по следующей формуле:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{2,3 \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} \text{ } ^\circ\text{C},$$

где: Δt_6 — большая по величине разность температур;
 Δt_m — меньшая по величине разность температур.

$$\Delta t_6 = t_{кл} - t_n$$

$$\Delta t_m = t_{кл} - t_k$$

Зная коэффициент теплопередачи K и $\Delta t_{\text{ср}}$, легко определить величину поверхности теплообмена:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{\text{ср}} \tau} \text{ м}^2.$$

Зная величину поверхности теплообмена и длину труб теплообменника, можно найти число труб:

$$n = \frac{F}{\pi d_{\text{ср}} l},$$

где: $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр трубы в м.

Зная число труб n , проверяют фактическую скорость теплоносителя в трубах по секундному его расходу $V \text{ м}^3/\text{сек}$.

$$v_{\text{ф}} = \frac{4v}{\pi d^2 n}.$$

Если скорость отличается от принятой в начале расчета, можно изменить длину труб или задаться другим значением ω .

Если $v_{\text{ф}} < v$, то теплообменник можно изготовить многоходовым; при этом число ходов m теплообменника определяют по формуле:

$$m = \frac{v}{v_{\text{ф}}}.$$

Для жидкостей, обладающих малой вязкостью, в большинстве случаев скорость принимают не ниже 0,1—0,3 м/сек и не более 2 м/сек, а для газов весовую скорость — в пределах 2—20 кг/м² сек.

Наиболее употребительны стальные трубы $d_{\text{нар}} = 25, 38$ и 57 мм. По нормам Главхиммаша кожухотрубные теплообменники выполняют трех основных типов: ТН, ТЛ и ТП (неподвижный корпус, линзовый и плавающая головка).

Основные параметры нормализованных теплообменников в м²:

5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 65, 80, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400 и т. д.

Диаметр кожуха в мм: 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 и 2000.

Длина трубок в мм: 1000, 1250, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 6000, 7000.

Пожарная опасность теплообменников

При эксплуатации теплообменников могут быть утечки нагреваемых жидкостей в результате образования неплотностей от коррозии материала, температурных деформаций и повышенного давления греющего пара или другого теплоносителя. Утечки огнеопасных жидкостей и газов при наличии источников воспламенения могут привести к возникновению пожара.

Температурные условия работы теплообменников таковы, что материал трубок и корпуса находится под воздействием различных температур: корпус омывается паром и воздухом, а трубки — паром и жидкостью.

Температурные условия резко меняются у периодически действующих подогревателей, а также в периоды пуска и остановки у непрерывнодействующих аппаратов. На изменение температурных условий работы корпуса влияет изменение температуры окружающей среды, особенно если аппараты расположены на открытом воздухе. Температурные напряжения будут тем больше, чем длиннее трубки теплообменника и чем больше разность температур между кожухом и пучком труб. При жестком креплении трубных решеток к корпусу, а трубок — к трубным решеткам возможно появление температурных напряжений. Известно, что при нагревании трубок на 200° и полном их защемлении с обоих концов, напряжения в материале достигают порядка 5000 кг/см^2 , что намного превышает допускаемые напряжения и должно было бы привести к разрушению. Но разрушения не происходит, так как трубки обладают значительной самокомпенсацией, то есть возможностью некоторой деформации. Большие температурные напряжения в первую очередь нарушают и разрушают плотность развальцовки. Снижение температурных напряжений достигается уменьшением разности температур между отдельными элементами аппарата и обеспечением независимых температурных деформаций между кожухом и пучком труб. Уменьшение разности температур достигается теплоизоляцией корпуса, медленным разогревом и охлаждением при остановке и пуске. Обеспечение независимых деформаций кожуха и трубок достигается устройством различного вида температурных компенсаторов.

Температурные компенсаторы устраиваются в том случае, если длина трубок более 2 м или разность температур между кожухом и пучком труб превышает 20° . Тепловые компенсаторы могут быть в виде «плавающей» головки, U-образных трубок, линзовых компенсаторов на кожухе. Конструктивное устройство указанных типов тепловых компенсаторов показано на рис. 8.

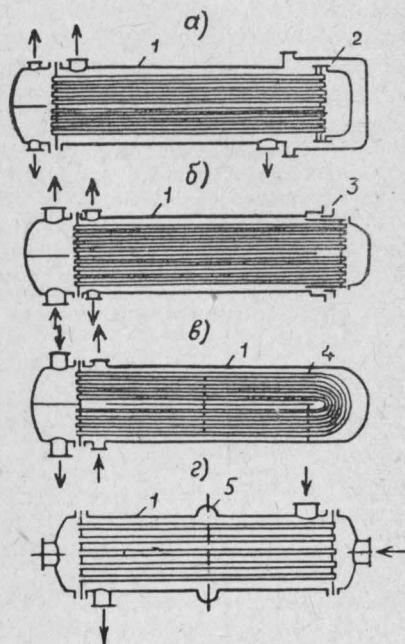


Рис. 8. Теплообменники с температурными компенсаторами:

а) — с «плавающей» головкой; б) — с сальниковым устройством; в) — с изогнутыми трубками; г) — с линзой на корпусе; 1 — корпус; 2 — «плавающая» головка; 3 — сальник; 4 — изогнутые трубки; 5 — линза.

Повышенное давление может образоваться при неправильной регулировке подачи греющего пара по недосмотру обслуживающего персонала; если отсутствуют автоматические регуляторы; при необходимости иметь пар более высокого давления, чтобы не снижать производительность аппарата в случае уменьшения коэффициента теплопередачи.

Уменьшение коэффициента теплопередачи от конденсирующегося пара к нагреваемому продукту может произойти в результате загрязнения теплообменной поверхности или скопления в паровом пространстве значительного количества неконденсирующихся газов.

Теплообменная поверхность загрязняется солями и различными примесями как со стороны продукта, так и со стороны пара. Такие загрязнения называются накипями. Так как теплопроводность слоя накипи значительно меньше теплопроводности материала стенки, то она является как бы теплоизоляционным слоем, препятствующим теплообмену. Насколько сильно слой накипи уменьшает коэффициент теплопередачи, показывает следующий пример.

В трубчатом теплообменнике подогревается этиловый спирт. Известно, что коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося водяного пара к стенке $\alpha_1 = 10\,000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}$; коэффициент теплоотдачи от стенки к спирту $\alpha_2 = 400 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}$. Толщина стальной трубы теплообменника $\delta = 4 \text{ мм}$, а коэффициент теплопроводности стали $\lambda = 36 \text{ ккал/м час град}$. Определить коэффициент теплопередачи K в случае, если:

а) стенки труб не имеют загрязнений;

б) на стенках имеется слой накипи толщиной 2 мм;

в) на стенках имеется слой накипи толщиной 4 мм;

Коэффициент теплопроводности накипи $\lambda_2 = 2 \text{ ккал/м час град}$.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}.$$

а) без накипи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{10\,000} + \frac{0,004}{36} + \frac{1}{400}} = \frac{1}{0,0001 + 0,0001 + 0,0025} = \\ = 370 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град},$$

б) при слое накипи в 2 мм:

$$K = \frac{1}{0,0001 + \frac{0,002}{2} + 0,0001 + 0,0025} = \frac{1}{0,0027 + 0,001} = \\ = \frac{1}{0,0037} = 270 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}.$$

в) при слое накипи в 4 мм:

$$K = \frac{1}{0,0027 + \frac{0,004}{2}} = \frac{1}{0,0047} = 213 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}.$$

На основании этого примера, а также практики эксплуатации можно считать, что накипь толщиной в 1 мм снижает коэффициент теплопередачи примерно на 15—20%, а толщиной в 5 мм — на 40—50%. Это приводит, как уже сказано выше, или к уменьшению производительности аппарата или к необходимости увеличения давления греющего пара.

Следовательно, теплообменную поверхность подогревателей необходимо периодически, в установленные инструкцией сроки, очищать от накипей и других отложений. Очистка поверхности производится путем прокачивания через аппарат слабых растворов щелочей, кислот или механическим способом.

Вода, поступающая в паровые котлы для производства пара, должна проходить химическую очистку для уменьшения ее жесткости, то есть для уменьшения количества содержащихся в ней солей.

При длительной работе подогревателей в паровом пространстве их может скапливаться газ, который поступает вместе с паром в аппарат, но не конденсируется. Известно, что водяной пар никогда не бывает свободен от примесей воздуха, углекислого и других газов, которые имеются в растворенном состоянии в воде.

Передача тепла газами в сотни раз меньше, чем передача тепла насыщенным паром при его конденсации. Отсюда понятно, что присутствие в водяном паре 5% воздуха уже снижает коэффициент теплопередачи примерно на 50%.

Для нормальной работы подогревателей необходимо, чтобы весь поступающий в него пар сконденсировался, а конденсат во избежание скопления непрерывно отводился. При этом нельзя допускать потери несконденсировавшегося пара с уходящим из него конденсатом. Конденсат удаляется из аппаратов через специальные устройства, называемые конденсатоотводчиками или водоотводчиками. Все водоотводчики устроены так, что при небольшом количестве конденсата клапан закрывает отверстие для отвода жидкости, а по мере накопления отверстие открывается и конденсат отводится из системы, но пар и несконденсировавшиеся газы вместе с жидкостью выйти не могут. Водоотводчики могут быть с закрытым или открытым поплавком, а также в виде подпорной шайбы. Вид водоотводчика конденсационного горшка выбирается по каталогу в зависимости от производительности, перепада давления. Расчетную производительность принимают для надежности в четыре раза больше действительной.

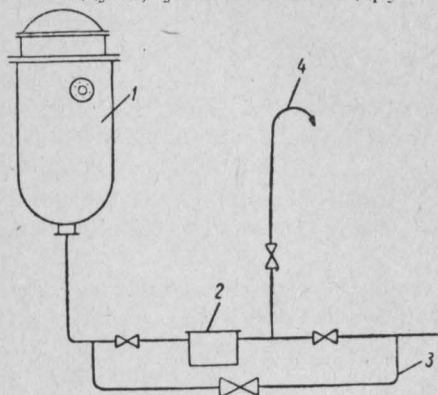


Рис. 9. Схема установки конденсационного горшка:

1—теплообменник; 2—конденсационный горшок; 3—обводная линия; 4—пробная линия.

Схема установки конденсационного горшка показана на рис. 9.

Горшок устанавливают ниже места отвода конденсата из теплообменника не менее чем на 0,5 м и снабжают его обводной линией для того, чтобы теплообменник мог работать бесперебойно и при ремонте (отключении) горшка. Контроль за работой можно вести измеряя температуру конденсата на выходе — она не должна превосходить температуру насыщения греющего пара в теплообменнике.

Наличие конденсационного горшка на линии отвода конденсата является причиной скопления в паровом пространстве неконденсирующихся газовых продуктов, резко снижающих коэффициент теплопередачи. Во избежание этого скапливающиеся газы необходимо отводить из системы путем периодической продувки.

Глава III

ОБОГРЕВ ТОПОЧНЫМИ ГАЗАМИ И ПЛАМЕНЕМ

Как было сказано выше, одним из наиболее широко применяемых источников тепла являются дымовые (топочные) газы и пламя, образующиеся при сжигании топлива. Огневой обогрев применяется в том случае, когда необходимо нагреть вещество от температуры 180° и выше и когда другие виды теплоносителей экономически невыгодны. Огневой обогрев применяется очень широко в машиностроительной, металлообрабатывающей, нефтяной и химической промышленности, в промышленности производства строительных материалов, на тепловых электростанциях и в котельных.

Тепловая энергия, получаемая при сжигании какого-либо топлива, передается теплообменной поверхности лучеиспусканием и конвекцией.

Приспособления и устройства для нагрева веществ топочными газами в целом называют печами или топками. Промышленные печи весьма разнообразны как по своему конструктивному устройству, так и по виду топлива и способу его сжигания.

Печи могут работать на кусковом, пылевидном, жидком и газообразном топливе.

Печи, работающие на кусковом твердом топливе, имеют ряд существенных недостатков, главными из которых являются их неэкономичность и сложность ухода за ними. При сжигании твердого топлива в виде каменного угля и дров печи, как правило, работают с большим избытком воздуха и имеют значительные механические потери в результате того, что несгоревшие частицы топлива уносятся дымовыми газами или попадают в шлак и золу. Сложность ухода за немеханизированными печами заключается в необходимости систематической подачи топлива, шуровки его на колосниках, уборки золы и шлака.

Кусковой уголь используется главным образом в небольших по мощности производственных котельных, на железнодорожном транспорте, в котельных жилых и общественных зданий.

На многих заводах в качестве твердого топлива используется лишь неполноценная древесина или отходы производства лесопильных, деревообрабатывающих заводов, заводов сухой перегонки древесины и т. п.

Наша социалистическая промышленность постепенно отходит от применения дров и кускового угля в качестве топлива.

Почти все производственные установки большой мощности переведены с кускового на пылевидное, жидкое или газовое топливо. Применение пылевидного топлива позволяет не только увеличить коэффициент полезного действия печей, но и использовать низкосортные бурые угли и сланцы, что имеет очень большое народнохозяйственное значение. Большинство производственных печей и тепловых электростанций работает на каменноугольной, сланцевой и торфяной пыли. Пылевидное топливо дает возможность иметь более высокий коэффициент полезного действия, облегчает возможность более точной регулировки температур и позволяет почти полностью механизировать и автоматизировать процесс подачи топлива.

После изобретения в 1880 году знаменитым русским ученым В. Г. Шуховым паронептяной форсунки, позволяющей использовать в качестве топлива распыленный мазут и другие нефтепродукты, широкое применение во всех отраслях промышленности получили печи, работающие на жидком топливе. Высокая теплотворная способность жидкого топлива, удобство его транспортировки и хранения, малые потери при сжигании, простота розжига и обслуживания печей сделали этот способ обогрева очень распространенным.

Поэтому сейчас в соответствии с решениями XXI съезда КПСС в топливной промышленности взят решительный курс на более широкое применение жидкого топлива, а также естественного и нефтяного газа. Удельный вес нефти и газа в общем производстве топлива возрастет с 31 до 51%, а угля соответственно уменьшится с 60 до 43%.

В предвоенные годы и особенно в послевоенный период в качестве промышленного топлива стали широко использовать естественные, искусственные газы и газы нефтепереработки. Советский Союз имеет неисчерпаемые запасы естественного горючего газа. Высокая теплотворная способность, удобство транспортировки на далекие расстояния и относительно небольшие капитальные затраты делают экономически выгодным широкое использование естественного газа на промышленных объектах и в населенных пунктах.

Директивами XXI съезда КПСС предусматривается довести добычу и производство газа в 1965 году до 150 млрд. м³, против 29,8 млрд. м³ в 1958 году. Темпы роста газовой промышленности будут намного превосходить темпы роста до 1959 года. За все пятое пятилетие прирост добычи и производство газа составили 4 млрд. м³, в 1956 году добыча газа увеличилась на 3 млрд. м³, в 1957 году — примерно на 7 млрд. м³, в 1958 году — примерно на 10 млрд. м³, а в 1965 году — возрастет примерно в пять раз.

Газ как топливо для технологических нужд способствует повышению производительности действующих печей, улучшению качества выпускаемой продукции. Освоение новых газовых месторождений, увеличение выработки генераторных газов, использование попутных нефтяных газов, развитие дальнего газоснабжения привели к переводу на газ как печей близлежащих городов и промышленных объектов, так и печей весьма отдаленных объектов. Печи, работающие на газообразном топливе, имеют высокие коэффициенты полезного действия, позволяют точно и легко регулировать температуру и осуществлять полную автоматизацию процесса.

В настоящее время в нашей промышленности наиболее распространенными являются печи, работающие на газообразном, жидком и пылевидном топливах.

Различают печи периодического действия, которые работают с перерывами для загрузки и выгрузки нагреваемого продукта, и печи непрерывного действия, которые останавливают только для профилактического и капитального ремонта. Наиболее широко распространены печи непрерывного действия, так как они более экономичны и имеют более высокую производительность при прочих равных условиях.

Печи периодического действия применяются в том случае, когда технология требует их периодической остановки (например, контактные печи при производстве синтетического каучука из спирта, кубы для производства нефтяного кокса и т. п.).

Печи для нагревания негорючих твердых веществ

В условиях производства нагреву подвергаются различные твердые негорючие вещества и изделия из них в виде заготовок и металлических болванок, труб, мелких деталей, кирпича, сосудов из глины и фарфора. Некоторые из твердых веществ при нагревании плавятся. Естественно, что печи для нагревания твердых негорючих веществ имеют другое устройство по сравнению с печами, предназначенными для нагрева жидкостей и газа.

Для нагревания болванок и различных металлических изделий, для закалки, отпуска, отжига или нормализации чаще всего используют калильные, кузнечные и закалочные печи, которые имеют прямоугольную, квадратную или продолговатую форму с металлическим каркасом и кирпичным заполнением, с плоским подом и сводчатым потолком (перекрыша). Изделия загружаются в печь и выгружаются из нее вручную или специальными устройствами в виде толкателей или цепных транспортеров. Как правило, эти печи работают на газообразном или жидком топливе. Форсунки и горелки монтируются в боковых стенках, чаще всего с двух противоположных сторон. Такие печи иногда не имеют дымовых труб, так как устройству их мешают находящиеся в цехах мостовые краны и другие передвижные приспособления, поэтому продукты горения выходят через имеющиеся щели непосредственно в цех.

Печи для нагревания сыпучих веществ и материалов до высоких температур (например, печи для обжига, спекания и т. п.)

бывают вертикальные (шахтного типа) или горизонтальные (вращающиеся). Шахтные печи представляют собой вертикальные сооружения с форсунками или горелками, расположенными в нижней части. Загрузка печей производится сверху, а выгрузка — снизу. Каркас печей металлический, заполнение кирпичное, внутренний слой кладки выполнен из огнеупорного кирпича. Вращающиеся (цилиндрические) печи представляют собой наклонно расположенные металлические цилиндры, футерованные изнутри огнеупорным кирпичом. Корпус цилиндрической вращающейся печи покоится на роликах и имеет зубчатый обод с червяком для медленного вращения. Форсунки или горелки размещаются со стороны наклонной части цилиндра по оси вращения его. Загрузка нагреваемого материала производится со стороны поднятой части цилиндра. В шахтных и вращающихся печах продукты горения движутся всегда навстречу нагреваемому материалу, который сперва высушивается, соприкасаясь с менее нагретыми дымовыми газами, а затем, медленно двигаясь вниз, постепенно нагревается до требуемой температуры. Печи, в которых твердые вещества нагреваются до температуры плавления (например, мартеновские, стекольные и др.), часто устраиваются с качающимся подом для удобства и быстроты слива расплавленной массы. Форсунки или горелки печей располагаются так, чтобы пламя находилось над поверхностью расплавленной массы.

Пожарная опасность таких печей определяется главным образом наличием системы топливоподачи, о чем будет говориться ниже.

Печи для нагревания жидкостей и газов

Для нагревания жидких веществ применяются печи периодического и непрерывного действия.

В печи периодического действия теплообменная поверхность представляет собой котел, замурованный в топку. По форме эти печи могут быть круглыми и прямоугольными, а их размеры определяются размерами котла и топливника. Очень часто для предохранения теплообменной поверхности от непосредственного воздействия языков пламени топливник изолируется от камеры теплообмена. Внутренняя поверхность топливника, камеры теплообмена и газоотводов футеруется огнеупорным кирпичом. Печи такого типа применяются для варки олиф, лаков, минеральных масел и т. п. Схема такой печи показана на рис. 10.

Печи непрерывного действия применяются очень широко и представляют собой размещаемую в топке теплообменную поверхность в виде пучка труб, идущих от одного коллектора к другому (например, паровые котлы), или в виде змеевика, составленного из последовательно соединенных труб (трубчатые печи для нагревания горючих жидкостей). Такие печи могут работать на всех видах топлива, но наиболее часто они работают на газовом, пылевидном или жидком топливе. Высокопроизводительные печи имеют несколько форсунок или горелок. Часто для питания форсунок применяются

два вида топлива. Устройство и работа паровых котлов в достаточной степени известны. Менее известны устройство и работа трубчатых печей, поэтому на них мы более подробно и остановимся.

Трубчатые печи применяются в качестве нагревателя при перегонке нефти и мазута, термическом и каталитическом крекинговых процессах, при пирогазификации, гидрогазификации и дегидрогазификации нефтепродуктов, разгонке каменноугольных и древесных смол, подогреве газообразных углеводородов и т. д. Все трубчатые печи, где бы они ни применялись, имеют принципиально одинаковое устройство (рис. 11).

По внешнему виду трубчатая печь представляет собой параллелепипед, средний размер $10 \times 10 \times 6$ м. Так как трубчатые печи чаще всего располагаются на открытых площадках, то для защиты от атмосферных осадков они имеют кровлю. Стены печей

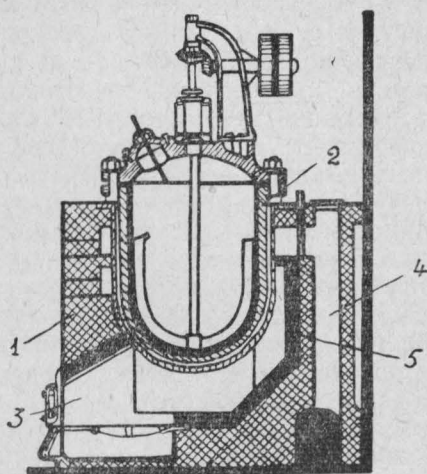


Рис. 10. Печь периодического действия:

1—кладка; 2—котел; 3—топливник; 4—дымовой канал; 5—огнеупорный кирпич.

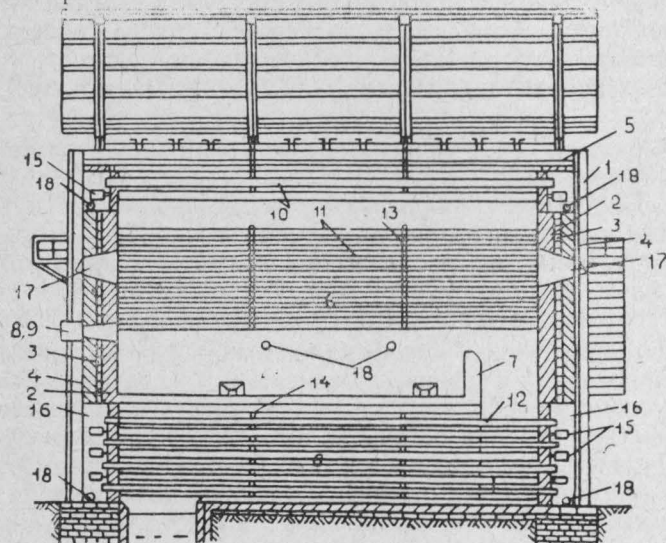


Рис. 11. Трубчатая печь нефтеперерабатывающих заводов:

А—радиантная камера; Б—конвекционная камера; 1—каркас печи; 2—огнеупорный кирпич; 3—теплоизоляционный кирпич; 4—красный кирпич; 5—свод печи; 6—подвески; 7—перевальная стенка; 8—форсунки; 9—воздушные короба; 10—потолочный экран; 11—боковые экраны; 12—конвекционные трубы; 13, 14—крепление труб; 15—двойники; 16—двойниковые шахты (короба); 17—предохранительные клапаны (дверцы); 18—устройство для паротушения.

каркасные. Металлический каркас 1 воспринимает нагрузку от основных элементов печи — свода, труб, арматуры, заполнения и т. п. Заполнение каркаса — многослойное. Внутренний слой выкладывается из огнеупорного кирпича 2, средний — из теплоизоляционного материала 3, а наружный — из красного кирпича 4. Стальной каркас печи наполовину выступает из кладки, чтобы избежать перегрева и потери несущей способности. Для компенсации температурных деформаций некоторые узлы каркаса соединены болтовыми соединениями с удлиненными отверстиями для болтов. Плоский свод 5 печи выкладывается из огнеупорного фасонного подвесного кирпича. Специальными стальными подвесками 6 кирпичи свода крепятся к каркасу. Внутри печь разделяется горизонтальной или вертикальной стенкой 7 на два объема, из которых больший является топочным пространством и называется камерой радиации А, а меньший — камерой конвекции Б. В камере радиации монтируются топливные форсунки 8, количество которых зависит от мощности печи и доходит до 16 и более. Печи всегда имеют два вида форсунок — газовые и жидкостные. Воздух, необходимый для сжигания топлива, подается в печь в подогретом состоянии по специальным воздушным трубам-коробам 9. Теплообменная поверхность в виде последовательно соединенных труб размещена в радиантной и в конвекционной камерах. Трубопроводы, расположенные в радиантной камере называются радиантными секциями или экранами (потолочный экран 10, боковые экраны 11, подовый экран). Обогрев этих трубопроводов происходит главным образом за счет теплового излучения факелов, пламени, раскаленных продуктов горения и разогретых стенок печи. Отношение количества тепла, передаваемого радиантным трубам, к общему количеству полезного тепла называется коэффициентом прямой отдачи и колеблется в пределах от 0,4 до 0,6.

Трубопроводы, расположенные в конвекционной камере, называются конвекционными трубами 12. В обогреве этих труб существенную роль играет теплопередача от дымовых газов путем конвекции. Для увеличения количества тепла, воспринимаемого конвекционными трубами, их располагают шахматным порядком очень близко друг к другу, заполняя весь объем камеры. Это повышает скорость движения и турбулентность дымовых газов.

Трубы радиантной и конвекционной камер соединяются между собой специальными фасонными отливками, так называемыми двойниками 15 или ретурбендами. Двойники дают возможность производить очистку труб при остановке печи, а также при необходимости осуществить замену одной из труб, не разбирая весь змеевик и не нарушая соседних соединений. Двойники выносятся за кладку печи и располагаются в специальных нишах — шахтах 16. Корпус двойника (рис. 12) имеет обычно четыре отверстия. В два из них ввальцовываются концы труб змеевика, а два противоположных отверстия, имеющих конусную форму, закрываются пробками, которые прижимаются распорным болтом с гайкой.

При работе печи продукты горения поступают из радиантной

камеры в конвекционную, а затем в боров и выбрасываются через дымовую трубу. В зависимости от назначения печи температура в зоне сгорания топлива может достигать до 1200—1400°. Температура дымовых продуктов на выходе из радиантной в конвекционную камеру колеблется около 800—900°, а при выходе из конвекционной камеры в боров она становится примерно на 150—200° выше температуры жидкости или газа, поступающих в печь. Скорость движения дымовых продуктов в конвекционных камерах обычно не превышает 2—3 м/сек.

Жидкость, подлежащая нагреванию, подается насосами в нижний ряд труб конвекционной камеры, и, проходя по змеевику, нагревается до заданной температуры. Температурные режимы нагрева продукта и его давление в змеевиках зависят от назначения печи и колеблются в весьма больших пределах (см. таблицу 2).

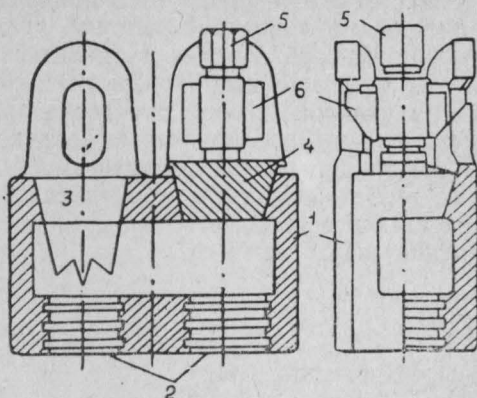


Рис. 12. Двойник для соединения труб змеевика (ретурбенда):

1 — корпус; 2 — отверстия для труб; 3 — отверстия для пробок; 4 — пробка; 5 — болт; 6 — распорная гайка.

Таблица 2

Установка, где применяется печь	Температура нагрева, °С	Давление перед входом в атм.
Первичная перегонка нефти	320 — 350	15 — 20
Термический крекинг	480 — 500	50 — 70
Гидрогенизация сланцевой смолы . .	430 — 450	300 — 310

Системы подачи и сжигания топлива в печах

Пылевидное, газообразное и жидкое топливо подается в печь на сжигание при помощи устройств, называемых горелками или форсунками.

Газовые горелки разделяются на диффузионные, или внешнего смешения, и инжекционные, или внутреннего смешения. Диффузионные горелки наиболее просты по устройству. Необходимый для горения газа воздух свободно притекает из окружающей среды к струям газа, выходящим из отверстий горелки. Если необходимо иметь длинный факел пламени с равномерной температурой по всей длине, то воздух подается к струе газа принудительно. Чем меньше толщина газовых струй, тем лучше происходит процесс диффузии газа с окружающим воздухом. К числу недостатков горелок этого типа следует отнести: а) необходимость большого объема топоч-

ного пространства; б) значительная неполнота сгорания, особенно при сжигании высококалорийного газа, в случае недостаточного дробления струй газа; в) соприкосновение светящегося факела с холодными поверхностями, что часто приводит к неполному сгоранию газа, образованию сажи и копоти.

В инжекционных горелках газозвушная смесь образуется в смесительной камере, по форме напоминающей трубу Вентури, путем инъецирования газом воздуха из окружающей атмосферы. Инъекция помогает составить смесь из газа и воздуха, не полностью подготовленную для сжигания (с недостатком воздуха в 40%). Недостающее количество воздуха поступает из внешней среды при горении газа.

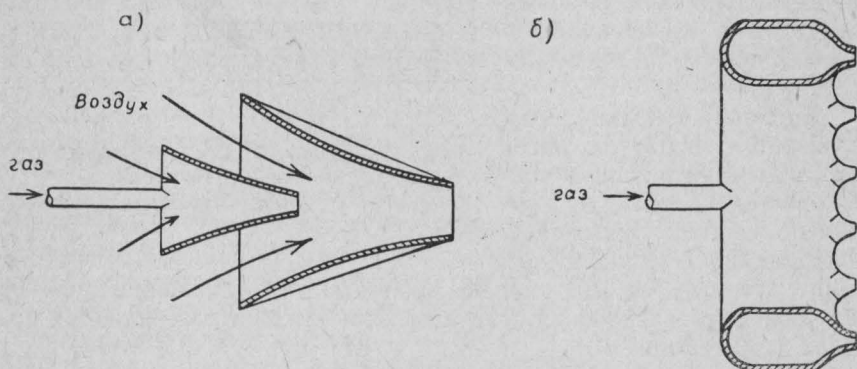


Рис. 13. Газовые горелки:

а) двухступенчатая инжекционная горелка; б) многосопловая диффузионная горелка.

В инжекционных горелках высокого давления, например, с двумя ступенями инъецирования, можно получить смесь, полностью подготовленную к горению, даже с небольшим избытком воздуха. Скорость истечения газозвушной смеси из сопла горелки должна соответствовать скорости распространения пламени (28—135 м/сек). При помощи таких горелок можно обеспечить сжигание газа от нескольких кубических метров до сотен кубических метров в час для любых промышленных установок и котельных.

На рисунке 13 показаны двухступенчатая инжекционная горелка (а) и многосопловая диффузионная газовая горелка (б).

Разводка газовых линий в цехах — верхняя; линии должны иметь отличительную окраску, не менее двух вентилей и приспособление для спуска конденсата.

Схема разводки газовых линий показана на рис. 14.

На газовых линиях необходимо иметь регуляторы давления.

На магистральной линии перед входом в здание необходимо устанавливать предохранительный клапан. Газовые линии, проходящие по улице или в неотапливаемых помещениях, необходимо защищать теплоизоляцией во избежание интенсивной конденсации паров воды и углеводов.

Жидкое топливо подается к форсункам самотеком, давлением воздуха или насосом. При подаче к печам топлива самотеком оно периодически закачивается в напорные топливные баки, расположенные вне цеха или внутри его. Каждый бак обычно обслуживает группу печей. Подача топлива самотеком широко применялась при работе на маловязких нефтетопливах. В настоящее время в связи с использованием вязких крекинг-мазатов этот метод следует считать устаревшим. Достоинство этого метода — в простоте установки, а недостатками являются ограниченность давления мазута, поступающего к форсункам, и сильные колебания в поступлении

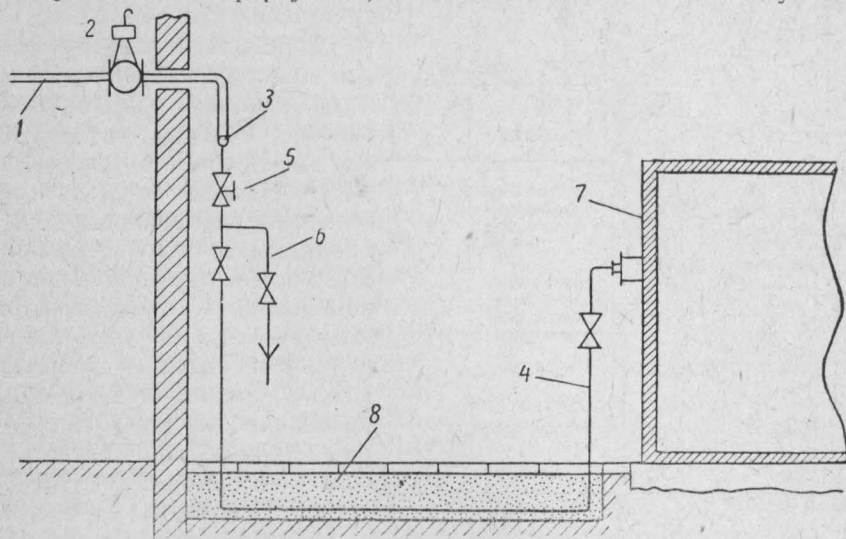


Рис. 14. Схема разводки газовых линий:

1—ввод; 2—предохранительный клапан; 3—газовый коллектор в цехе; 4—газовая линия к печи; 5—регулятор давления; 6—линия для спуска конденсата; 7—печь; 8—траншея, засыпанная песком.

мазута вследствие изменения вязкости при изменении его температуры. Серьезным недостатком этого способа является также и то, что напорные баки необходимо устанавливать высоко и по возможности ближе к печам, а это увеличивает пожарную опасность.

Подача топлива сжатым воздухом производится очень редко и здесь не рассматривается.

Подача топлива насосом является в настоящее время наиболее распространенным способом в связи с переходом на вязкие мазуты, требующие подачи его под давлением. Применяются три схемы подачи топлива к печам (рис. 15): тупиковая (а); кольцевая (б) и циркуляционная (в). Все схемы предусматривают наличие предохранительного клапана на линии, установленного параллельно насосу 2. Во всех схемах на ответвлениях для обеспечения постоянства давления мазута у форсунок устанавливают регуляторы давления «после себя». Прокладка трубопроводов ведется с уклоном в сторону емкости с мазутом, с целью обеспечения возможности опорожнения всех линий при ремонте.

Достоинством кольцевой системы является то, что даже при аварии в сети в большинстве случаев нет необходимости в остановке печей, так как можно выключить только поврежденный участок.

При циркуляционном способе насос подает в кольцевую линию топлива в 3—5 раз больше потребного количества.

Избыток топлива поступает по обратной линии в бак. Это обеспечивает более равномерную подачу топлива независимо от количества включенных потребителей и меньшую разность температур мазута у отдельных потребителей.

В качестве подогревателей мазута в указанных схемах питания применяются обычно паровые трубчатые или змеевиковые теплообменники. Насосы и мазутная емкость размещаются вне производственного цеха или в изолированном подвальном помещении с самостоятельным выходом наружу. Оборудование емкостей в цеховом мазутохранилище и оборудование напорных топливных баков должно соответствовать требованиям НпТУ 108-56. Некоторые из требований пожарной безопасности приводятся ниже.

Предельная температура подогрева топлива в расходных бачках определяется величиной температуры вспышки жидкости. Во всех случаях в емкостях с наличием воздушного пространства температура при подогреве топлива должна быть на 10—15° ниже его температуры вспышки. При подогреве

нельзя допускать обнажение паровых труб из-за опасности чрезмерного повышения температуры нефтепродукта.

Цеховые мазутопроводы состоят из газовых труб, рассчитанных на давление 12—15 атм (за исключением случаев, когда топливо подается самотеком). Мазутопроводы должны иметь исправную теплоизоляцию. При работе на вязком мазуте или при прокладке линии по неотапливаемым помещениям и по эстакадам параллель-

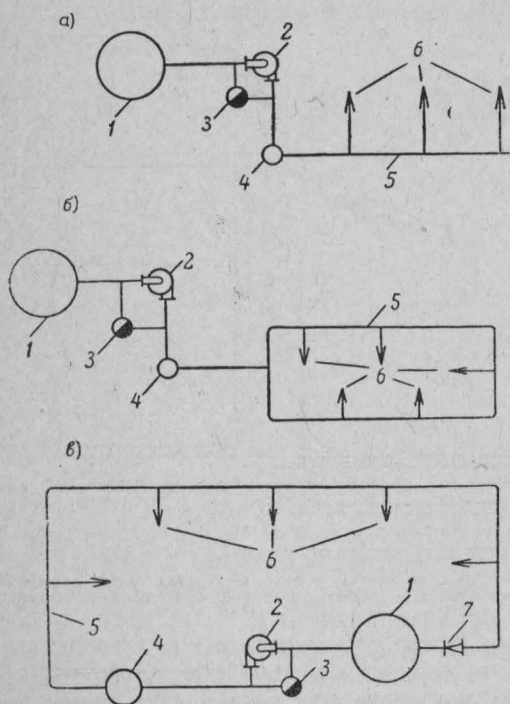


Рис. 15. Схемы подачи жидкого топлива к печам:

а) тупиковая; б) кольцевая; в) циркуляционная;
1—резервуар для мазута; 2—насос; 3—предохранительный клапан; 4—подогреватель; 5—магистральная линия; 6—ответвления к печам; 7—регулятор.

но мазутной (рядом с ней) прокладывают паровую трубу. Скорость движения мазута в трубопроводах принимают равной $0,5 \text{ м/сек}$. Разводка рабочих линий производится всегда снизу вверх, чтобы избежать возможности замазучивания конструкций и аппаратов при утечках и повреждениях. Через 50—80 м по длине линии устанавливаются задвижки. Маховики задвижек располагаются так, чтобы не было возможности повреждения их цеховым транспортом. Траншеи лучше засыпать песком и перекрывать листами железа или бетонными плитами.

Как видно из приведенной на рис. 16 схемы, горячая смесь топлива выбрасывается форсункой с определенной скоростью. Ввиду разлета струи (конусности) и сопротивления воздуха скорость потока уменьшается по мере удаления от форсунки, в то же время скорость распространения пламени увеличивается по мере удаления от сопла форсунки, что объясняется лучшим перемешиванием с воздухом и более высокой температурой. Воспламенение топлива происходит в том месте, где скорость потока уравнивается со скоростью распространения пламени.

Понятно, что чем больше скорость истечения смеси и чем меньше скорость воспламенения, тем дальше от сопла форсунки происходит горение. Поэтому при розжиге печи, когда стенки еще не накалились и скорость воспламенения горючей смеси невелика, возможен отрыв пламени от форсунки и его затухание.

При сжигании жидкого топлива весь воздух необходимо подводить к корню факела, чтобы процесс воспламенения протекал преимущественно в области окислительных реакций. Это необходимо для того, чтобы избежать явления крекинга, ибо образующиеся при крекинге высокомолекулярные соединения трудно и медленно окисляются. Сгорая, жидкое топливо выделяет большое количество раскаленных частиц углерода, которые создают видимое свечение, то есть явление факела. Чем меньше распыл топлива, тем больше свечение факела. Отсюда вытекает явная необходимость хорошего распыления топлива. Для распыления топлива применяются различные конструкции форсунок воздушного распыления низкого давления и воздушного или парового распыления высокого давления.

Форсунки низкого давления обычно работают на воздухе с давлением от 200 до 3000 мм вод. столба, расход воздуха составляет от 40 до 100% потребного для горения. Они применяются почти на всех печах малой и средней термической мощности. Простейшая

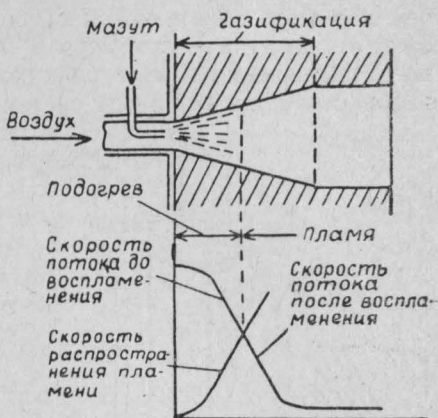


Рис. 16. Схема процесса испарения и горения жидкого топлива.

форсунка низкого давления системы Грум-Гржимайло показана на рис. 17. Сопло ее делается коническим для увеличения скорости истечения воздуха и, следовательно, лучшего распыления. Производительность таких форсунок колеблется от 10 до 100 кг мазута/час. Примерный расход воздуха — 10 кг/кг мазута.

В форсунках высокого давления распыление топлива производится паром или сжатым (компрессорным) воздухом. Давление применяемого пара лежит обычно в пределах от 2 до 12 атм, причем пар может быть как насыщенный, так и перегретый. Давление сжатого воздуха — от 2 до 8 атм. Форсунки парового и воздушного распыления имеют одинаковое устройство. Наиболее широко распространена форсунка системы В. Г. Шухова. Расход мазута

в зависимости от номера форсунки может достигать от 3 до 350 кг/час. Расход распылителя составляет обычно 1 м³ воздуха на 1 кг мазута, а пара — от 0,3 до 0,5 кг на 1 кг мазута.

Разрез форсунки системы Шухова показан на рис. 18.

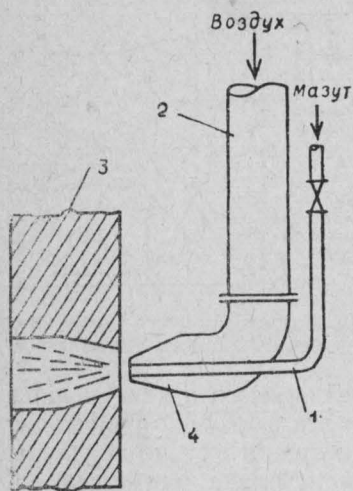


Рис. 17. Форсунка низкого давления системы Грум-Гржимайло:

1 — линия мазута; 2 — линия воздуха;
3 — стенка печи; 4 — сопло.

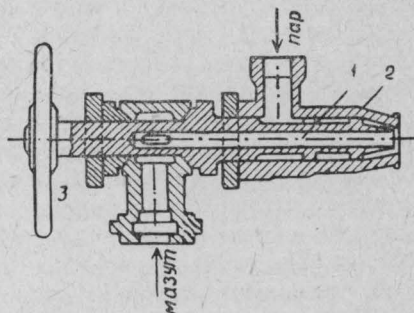


Рис. 18. Форсунка системы Шухова:

1 — внутренняя труба; 2 — наружная труба;
3 — маховичок.

Форсунки высокого давления обладают следующими преимуществами:

— они имеют малые размеры при производительности до 300—350 кг/час;

— мало капризны в работе, допускают работу при некотором засорении или увеличении диаметра сопла в результате выгорания металла, но производят большой шум.

Паровое распыление топлива несколько экономичнее, чем воздушное.

Пылевидное топливо подается к горелке струей воздуха. Приготовление пыли на энергетических установках может производиться по индивидуальным системам и по централизованной системе.

Схема индивидуального пылеприготовления показана на рис. 19.

Угольный факел труднее воспламеняется и менее устойчив при горении, чем факел жидкого или газового топлива. Для обеспечения безопасности при розжиге печь обычно нагревают выше температуры самовоспламенения пыли и только после этого открывают доступ пыли. Следовательно, печи пылевидного топлива имеют еще дополнительную систему жидкостных или газовых форсунок и горелок. Ими разогревают печь, они же автоматически включаются при обрыве основного факела пламени.

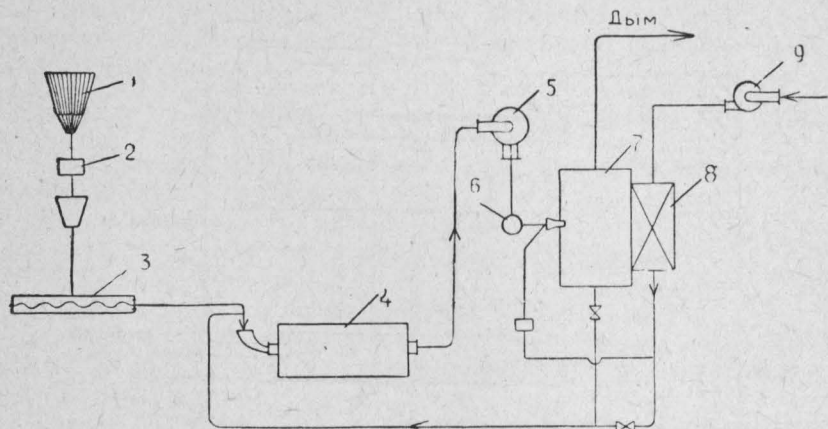


Рис. 19. Схема индивидуального пылеприготовления:

1—бункер; 2—весы; 3—шнек; 4—шаровая мельница; 5—вентилятор; 6—коллектор первичного воздуха; 7—печь; 8—воздухоподогреватель; 9—вентилятор.

Подогрев воздуха, потребного для сжигания топлива

Коэффициент полезного действия топки может быть повышен и температура горения топлива увеличена, если воздух, потребный для горения топлива, подавать не холодным, а подогретым, так как на подогрев большого количества воздуха затрачивается большое количество тепла. Вместе с тем тепло дымовых газов в печах и котельных установках используется неполностью, горячие газы, имеющие высокую температуру, выбрасываются наружу. Возникает мысль о возможности использования теплоты отработанных дымовых газов для подогрева холодного воздуха. Существует очень много систем воздухоподогревателей, но все их можно разбить на две принципиально различные группы: рекуператоры и регенераторы. Рекуператоры представляют собой теплообменники различных конструкций, в которых тепло от дымовых газов к воздуху передается через стенку, как показано на рис. 20. Регенераторы представляют собой камеры, выложенные огнеупорным кирпичом в клетку, через которые попеременно проходит дымовой газ (насадка нагревается) и воздух (насадка охлаждается). Регенеративные камеры применяются в коксовых, мартеновских и др. печах.

Рециркуляция дымовых газов

Недостатками прямого обогрева дымовыми газами являются неравномерность обогрева, трудность его регулирования, окисление металла теплообменной поверхности при разбавлении газов большим количеством воздуха. Эти недостатки могут быть в некоторой степени устранены применением рециркуляции дымовых газов. В этом случае через дымовую трубу выбрасывается не все коли-

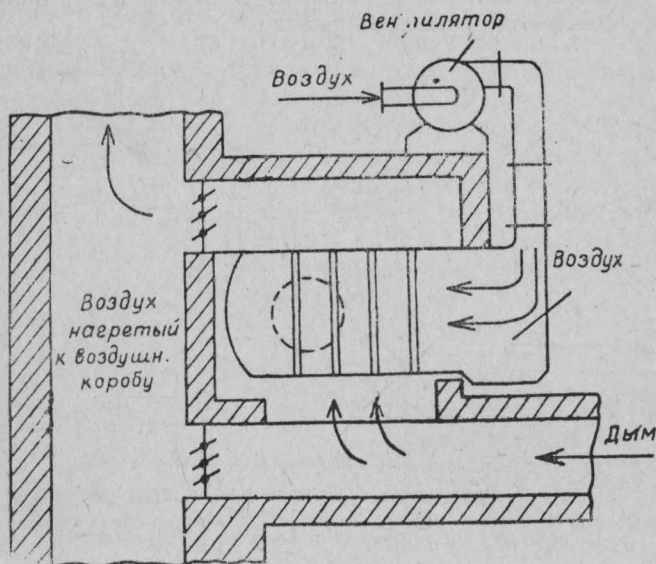


Рис. 20. Схема печи с подогревом воздуха.

чество, а только часть дымовых газов, остальная часть вентиляторами или эжекционными устройствами подается вновь в камеру горения над факелами пламени. Этими газами регулируется температура нагрева, обеспечивается большая мягкость нагрева в радиантной камере и в то же время увеличивается коэффициент теплопередачи конвекцией за счет увеличения скорости движения и турбулентности дымового потока вследствие увеличения объема дымовых продуктов. Поток рециркуляционных газов создается за счет установки на рециркуляционной линии дымового вентилятора или воздушного эжектора.

Беспламенное (поверхностное) сжигание топлива

Чрезвычайно важно обеспечить смешение топлива с воздухом в форсунке до наступления процесса горения, так как от этого зависит полнота использования топлива. В последнее время стало уделяться большое внимание вопросу поверхностного горения топлива. Некоторые огнеупорные материалы способны катализировать

процесс горения. На поверхности таких материалов процесс горения топлива может происходить с теоретическим количеством воздуха, причем горение происходит очень быстро, без образования пламени, а керамика раскаляется до очень высоких температур. Такое поверхностное горение называют также беспламенным горением.

Расчет огневых печей¹

При расчете огневых печей обычно бывают заданы: производительность печи, температура нагреваемого продукта, температурные интервалы нагревания, вид топлива. Требуется определить расход горючего, величину теплообменной поверхности, размеры основных элементов печи.

1. Определение количества потребного топлива

Для определения потребного количества топлива напомним уравнение теплового баланса печи.

Приход тепла равен расходу тепла,

$$BQ_0 = Q_1 + B(Q_2 + Q_3 + Q_4) + Q_5,$$

где: B — расход топлива в кг/час или кг/операцию;

Q_0 — приход тепла с одним кг топлива;

Q_1 — количество тепла, необходимое для нагревания продукта;

Q_2, Q_3, Q_4 — потери тепла с уходящими газами и от неполноты сгорания;

Q_5 — потери тепла кладкой печи в окружающую среду.

Определение количества тепла, поступающего с 1 кг топлива — Q_0 .

а) количество тепла, выделяющееся при сгорании топлива, равно низшей теплотворной способности топлива $q_{\text{низш}}$ — ккал/кг;

б) тепло, приносимое в печь топливом:

$$q_T = c_T t_T,$$

где: c_T — теплоемкость топлива, ккал/кг град;

t_T — температура топлива;

в) тепло, приносимое в печь воздухом:

$$q_B = L(0,24 + 0,46x)t_B,$$

где: L — количество воздуха в кг на кг топлива;

0,24 — теплоемкость воздуха;

0,46 — теплоемкость водяных паров;

x — влагосодержание в кг/кг сухого воздуха;

t_B — температура воздуха в °C.

¹ Метод расчета заимствован из учебных пособий: проф. А. Г. Касаткина. Основные процессы и аппараты химической технологии. Госхимиздат, 1955; Г. Г. Рабиновича и др. Процессы и аппараты в нефтеперерабатывающей промышленности. Гостоптехиздат, 1952.

Зная вид топлива, по таблицам определяем его состав, то есть содержание горючей и негорючей составляющей:

$$C^P; H^P; O^P; S^P; N^P; W^P; A^P.$$

Теоретически для полного сгорания одного килограмма топлива необходимо иметь следующее количество кислорода:

$$G_{\text{кисл}} = \left(\frac{32}{12} C^P + \frac{16}{2} H^P + \frac{32}{32} S^P - O^P \right) 0,01 \text{ кг/кг топлива.}$$

Но так как горение происходит не в чистом кислороде, а в воздухе, количество воздуха можно определить следующим образом:

$$L_{\text{теор}} = \frac{100}{23,2 \cdot 100} \left(\frac{32}{12} C^P + \frac{16}{2} H^P + S^P - O^P \right),$$

или

$$L_{\text{теор}} = 0,3478 \left(\frac{C^P}{3} + H^P + \frac{S^P}{8} - \frac{O^P}{8} \right) \text{ кг/кг топлива.}$$

23,2% — количество кислорода, находящегося в воздухе (в весовых единицах).

Чтобы обеспечить полное сгорание топлива, применяют расход воздуха больше теоретического, вводя так называемый коэффициент избытка воздуха (α). Коэффициентом избытка воздуха называется отношение действительно необходимого, практического расхода воздуха к теоретическому, то есть

$$\alpha = \frac{L}{L_{\text{теор}}}.$$

Величина коэффициента α зависит от вида сжигаемого топлива и принимается:¹

для твердого топлива	$\alpha = 1,5-1,8,$
для жидкого топлива	$\alpha = 1,2-1,6,$
для газообразного топлива	$\alpha = 1,1-1,25.$

Следовательно, $L = \alpha L_{\text{теор}}$, или

$$L = 0,3478 \alpha \left(\frac{C^P}{3} + H + \frac{S^P}{8} - \frac{O^P}{8} \right) \text{ кг/кг топлива.}$$

Подставляя найденное значение L в формулу (в), определяем количество тепла q_B . Общее количество тепла, поступающего с топливом в печь, будет равно:

$$Q_0 = q_{\text{низш}} + q_T + q_B \text{ ккал/кг топлива.}$$

Определение количества полезного тепла — Q_1 . Полезное тепло складывается из количества тепла, необходимого для нагревания про-

¹ См. Г. Г. Рабинович и др. Процессы и аппараты в нефтеперерабатывающей промышленности. Гостоптехиздат, 1952.

дукта, аппаратуры, и тепла, теряемого за счет теплопотерь в окружающую среду выступающими из кладки частями аппарата.

а) Тепло, потребное на нагревание продукта, испарение и химическую реакцию:

$$q_{\text{пр}} = G_{\text{пр}} c_{\text{пр}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) + r G_{\text{пр}}^1 + q_{\text{хим}} \text{ ккал/час; ккал/операцию,}$$

где: $G_{\text{пр}}^1 r$ — теплота испарения, ккал/кг;

$G_{\text{пр}}$ — количество испарившегося продукта;

$q_{\text{хим}}$ — количество тепла, расходуемого на разложение или образование новых веществ.

б) Тепло, потребное для нагрева аппаратуры (для периодически действующих печей):

$$q_{\text{апп}} = G_{\text{апп}} c_{\text{апп}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) \text{ ккал/операцию.}$$

в) Тепло, теряемое выступающими частями аппарата:

$$q_{\text{апп}}^1 = \alpha_2 F \tau (t_{\text{пов}} - t_{\text{возд}}) \text{ ккал/час; ккал/операцию.}$$

Следовательно, общее количество тепла, расходуемого на нагрев продукта, будет равно:

$$Q_1 = q_{\text{пр}} + q_{\text{апп}} + q_{\text{апп}}^1.$$

Определение потерь тепла с отходящими дымовыми газами. Чтобы определить, какое количество тепла уходит с дымовыми газами, необходимо найти количество продуктов горения, а также температуру дымовых газов в топочном пространстве и у боров:

а) Количество продуктов горения будет равно (исходя из химического состава топлива и реакций горения):

$$\text{Вес } \text{CO}_2 = \frac{44}{12} \frac{C^p}{100} \text{ кг/кг топлива} = g_1.$$

$$\text{Вес } \text{H}_2\text{O} = \frac{18}{2} \frac{H^p}{100} \text{ кг/кг топлива} = g_2.$$

$$\text{Вес } \text{O}_2 = (\alpha - 1) L_{\text{теор}} 0,232 \text{ кг/кг топлива} = g_3.$$

$$\text{Вес } \text{N}_2 = \alpha L_{\text{теор}} 0,77 \text{ кг/кг топлива} = g_4.$$

Для определения потерь тепла с отходящими газами необходимо задаться температурой отходящих газов из печи (порядка 300—350° или на 150—200° выше температуры поступающего на нагревание продукта), тогда:

$$Q_2 = \sum q_i c_i t_i = (q_1 c_1 + q_2 c_2 + q_3 c_3 + q_4 c_4) t_r,$$

где: c_i — теплоемкость газов при температуре 300—350°.

Известно, что $c_t = c_0 + at_r$ или в нашем случае:

$$c_1 = 0,2 + 0,000075 \cdot t_r \text{ ккал/кг } ^\circ\text{C}$$

$$c_2 = 0,4475 + 0,0000278 \cdot t_r \quad "$$

$$c_3 = 0,2152 + 0,000141 \cdot t_r \quad "$$

$$c_4 = 0,23875 + 0,000016 \cdot t_r \quad "$$

Определение потерь тепла Q_3 от химической неполноты горения.

При полном сгорании: $C + O_2 = CO_2 + 8100 \text{ ккал/кг.}$ } Разность
 При неполном сгорании: $C + O = CO + 2430 \text{ ккал/кг.}$ } 5670
ккал/кг.

$$\text{Следовательно: } Q_3 = 5670 \frac{C^P}{100} \frac{CO}{(CO_2 + CO)},$$

где: CO_2 и CO — % содержание их в газе.

Содержание CO_2 и CO в дымовых газах задается по аналогии с действующими однотипными печами по данным анализа продуктов горения.

Примерно Q_3 можно определить, зная, что оно колеблется в следующих пределах:

— для твердого топлива: $Q_3 \approx (0,115 - 0,02) q_{\text{низш}} \text{ ккал/кг;}$

— для жидкого и газообразного топлива: $Q_3 \approx (0,005 - 0,115) q_{\text{низш}} \text{ ккал/кг.}$

Определение потерь тепла Q_4 от механической неполноты горения. При сжигании твердого топлива некоторое количество его теряется со шлаком и уносится дымовыми газами. Эти потери определяются по уравнению:

$$Q_4 = \frac{81c_{\text{ш}} + 120}{100 - c_{\text{ш}}} A^P \text{ ккал/кг топлива,}$$

где: A^P — содержание золы в рабочей массе топлива, в %;

$c_{\text{ш}}$ — содержание несгоревшего углерода в шлаке (обычно для антрацита и каменных углей 15—20%; для бурых углей 15—25%).

Для жидкого и газообразного топлива $Q_4 = 0$.

Определение потерь тепла кладкой печи в окружающую среду (Q_5). Задаваясь из условий безопасности и экономичности температурой наружной поверхности стенки печи ($t_{\text{ст}}$) и примерными размерами печи, определяем:

$$Q_{\text{верт}} = \alpha_V F_V (t_{\text{ст}} - t_{\text{возд}}) \text{ ккал/час,}$$

$$Q_{\text{гор}} = \alpha_{\Gamma} F_{\Gamma} (t_{\text{ст}} - t_{\text{возд}}) \text{ ккал/час,}$$

где: $\alpha_{V, \Gamma}$ — коэффициент теплоотдачи от стенки (вертикальной и горизонтальной) в воздух.

Следовательно: $Q_5 = Q_{\text{гор}} + Q_{\text{верт}}.$

Подставляя все найденные значения в уравнение теплового баланса, находим требуемое количество топлива B .

Так как: $B Q_0 = Q_1 + B(Q_2 + Q_3 + Q_4) + Q_5$,

$$B = \frac{Q_1 + Q_5}{Q_0 - (Q_2 + Q_3 + Q_4)} \text{ кг/час.}$$

2. Определение величины поверхности обогрева

Тепло к теплообменной поверхности передается от дымовых газов путем теплоизлучения и конвекции, а от факелов пламени — излучением. От теплообменной поверхности тепло передается нагреваемым жидким продуктом только конвекцией. Обычно коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой жидкости во много раз больше коэффициента теплоотдачи от газа к стенке и, следовательно, при расчете можно учитывать только коэффициент теплоотдачи от газов к стенке, то есть $K \approx \alpha$ ккал/м² час град.

Так как теплоотдача от газов к стенке происходит путем теплоизлучения и конвекции, то

$$\alpha_1 = \alpha_l + \alpha_k.$$

Коэффициент теплоотдачи α_l можно определить по следующей формуле:

$$\alpha_l = \frac{c_{1-2}}{\Delta t_{cp}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ ккал/м}^2 \text{ час град.}$$

где: c_{1-2} — коэффициент взаимного излучения газов и стенок, принимается равным 0,543 ккал/м² час $\left(\frac{^\circ\text{K}}{100} \right)$;

T_1 — абсолютная рабочая температура газов (то есть рабочая +273°);

T_2 — абсолютная температура наружной поверхности теплообмена.

Чтобы определить температуру в топочном пространстве, необходимо знать максимальную температуру при горении топлива:

$$t_{\text{раб}} = t_{\text{max}} \eta_T (1 - \sigma),$$

где: η_T — коэффициент полезного действия топки, обычно принимается равным 0,95—0,98;

σ — коэффициент отдачи тепла от пламени радиацией, обычно принимается равным 0—0,6.

Максимальная температура при горении топлива может быть определена по следующей формуле:

$$t_{\text{max}} = \frac{Q_0}{\sum g_i c_i},$$

где: g_i — весовые содержания составляющих продуктов горения;
 c_i — теплоемкости газов при t_{max} .

$$c_i = c_0 + \alpha t_{\text{max}}$$

Чтобы найти t_{\max} , необходимо задаться температурой, найти теплоемкости, а затем, если получилось большое расхождение, повторить расчет.

Средняя температура дымовых газов и теплообменной поверхности:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(t_{\text{раб}} + t_{\text{кон}}) + (t_{\text{к ст}} + t_{\text{н ст}})}{4},$$

где: $t_{\text{раб}}$ и $t_{\text{кон}}$ — температура дымовых продуктов при входе в конвекционную камеру и при выходе из нее;
 $t_{\text{к ст}}$ и $t_{\text{н ст}}$ — температура поверхности трубы в конце и начале змеевика.

Коэффициент теплоотдачи радиацией от газового слоя к стенке приближенно можно определить по следующей формуле¹:

$$\alpha_{\text{л}} = 0,022 t_{\text{г}} + 0,15 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град},$$

где: $t_{\text{г}}$ — средняя температура газа в °C, то есть $\frac{t_{\text{раб}} + t_{\text{кон}}}{2}$.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{к}}$ конвекцией можно определить по формуле

$$Nu_f = 0,021; Re_f^{0,8}, Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}.$$

Для ориентировочных расчетов с достаточной точностью коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции ($\alpha_{\text{к}}$) может быть определен по следующей формуле¹:

$$\alpha_{\text{к}} = \psi \sqrt[4]{T_{\text{раб}} - t_{\text{г}}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час град},$$

где: ψ — константа, зависящая от формы теплообменной поверхности. Для труб диаметром от 50 до 125 мм можно принять $\psi = 1,8$.

$T_{\text{раб}}$ — абсолютная температура газов в топке;

$t_{\text{г}}$ — средняя температура стенки трубы, то есть $\frac{t_{\text{к ст}} + t_{\text{н ст}}}{2}$.

Найдя коэффициент теплопередачи, можно определить необходимую площадь теплообменной поверхности:

$$F = \frac{Q_1}{k \Delta t_{\text{ср}}} \text{ м}^2.$$

3. Определение основных размеров камеры теплообмена и дымовых каналов

Определение объема и размеров камеры горения. Объем камеры горения зависит от количества тепла, выделяющегося при горении топлива в единицу времени, и от величины теплового напряжения топочного пространства.

¹ См. Г. Г. Рабинович и др. Процессы и аппараты в нефтеперерабатывающей промышленности. Гостоптехиздат, 1952, стр. 84.

Под теплонапряжением A топчного пространства понимается количество тепла в ккал, выделяющееся при сгорании топлива из расчета на 1 м^3 камеры сгорания в течение 1 часа ($\text{ккал/м}^3 \text{ час}$).

Для современных печей величина A составляет от 35 000 до 1 000 000 $\text{ккал/м}^3 \text{ час}$ в зависимости от рода топлива. Теплонапряжение топчного пространства принимают: при генераторном и природном газе и торфе — 200—250 *тыс.*; при каменных углях и антраците — 250—350 *тыс.*, при подмосковном угле — 150—200 *тыс.*; при мазуте — 200—300 *тыс. ккал/м}^3 \text{ час}.*

Зная теплонапряжение и количество сгораемого топлива, найдем:

$$V_{\text{камеры}} = \frac{Q_0 B}{A} \text{ м}^3.$$

Площадь S камеры определяют, задаваясь тепловым напряжением поперечного сечения камеры C , то есть количеством топлива, проходящимся на 1 кв. м площади пода в 1 час ($\text{ккал/м}^2 \text{ час}$).

$$S_{\text{камеры}} = \frac{B}{C} \text{ м}^2.$$

Обычно принимают $C = 15\text{—}25 \text{ кг топлива/м}^2 \text{ час}$.

Зная объем и площадь камеры горения, легко найти ее высоту.

Определение объема и размеров камеры теплоотдачи. Объем камеры теплоотдачи определяется исходя из объема продуктов горения и скорости их движения.

Объем продуктов горения легко можно определить, зная весовые количества и температуру составляющих дым продуктов (CO_2 , H_2O , O_2 и N_2).

При температуре 0° и давлении 760 мм рт. ст. их объем будет равен:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{g_{\text{CO}_2}}{\gamma_{\text{CO}_2}} = \frac{g_{\text{CO}_2}}{1,98} \text{ м}^3/\text{кг топлива},$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{g_{\text{H}_2\text{O}}}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{g_{\text{H}_2\text{O}}}{0,8} \text{ м}^3/\text{кг топлива},$$

$$V_{\text{O}_2} = \frac{g_{\text{O}_2}}{\gamma_{\text{O}_2}} = \frac{g_{\text{O}_2}}{1,43} \text{ м}^3/\text{кг топлива},$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{g_{\text{N}_2}}{\gamma_{\text{N}_2}} = \frac{g_{\text{N}_2}}{1,25} \text{ м}^3/\text{кг топлива}.$$

Общий объем продуктов горения при $t = 0$:

$$V_0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} \text{ м}^3/\text{кг топлива}.$$

Объем газа при средней температуре дымовых продуктов ($t_{\text{ср г}}$) будет равен:

$$V_{\text{газа}} = V_0 B \frac{273 + t_{\text{ср г}}}{273} \text{ м}^3/\text{час}.$$

Задаваясь оптимальной скоростью движения (v) дымовых газов (в пределах от 3 до 5 м/сек), определяем площадь живого сечения теплообменной камеры:

$$S_{\text{камеры свободн.}} = \frac{V_{\text{газа}}}{v3600} \text{ м}^2.$$

Делая поправку на площадь, занимаемую змеевиком, определяем действительные размеры сечения камеры теплообмена и ее высоту.

Определение площади сечения борова и дымовых каналов. Площадь сечения борова и дымовых каналов определяется исходя из объема дымовых газов и оптимальной скорости движения их.

Объем дымовых продуктов можно в любом сечении определить по уравнению:

$$V_{\text{газа}} = V_0 \frac{t_{\text{газа}} + 273}{273} \text{ м}^3/\text{час.}$$

Принимая скорость дымовых газов равной 4—8 м/сек., находим площадь сечения борова или дымовых каналов:

$$S = \frac{V_{\text{газа}}}{v3600} \text{ м}^2.$$

Пожарная опасность печей

При эксплуатации нагревательных печей, работающих на газообразном и жидком топливе, могут иметь место:

- А. взрывы в топочном пространстве печей и в боровах;
- Б. прогары теплообменной поверхности с последующим пожаром или взрывом;
- В. пожары в результате неисправности топливных коммуникаций.

Рассмотрим кратко причины этих явлений.

А. Взрывы в топочном пространстве печей происходят главным образом в момент розжига форсунок или в момент внезапного обрыва факела пламени при последующем возобновлении подачи топлива. Перед розжигом печи в топочном пространстве могут находиться пары горючей жидкости или газ в результате неплотного закрытия или неисправностей вентилях на топливной линии, а также при неисправности теплообменной поверхности. Образование взрывоопасной смеси и взрыв могут произойти также при нарушении установленной очередности операций по розжигу печи. Чтобы избежать этого, необходимо строго соблюдать установленный порядок розжига печей.

Обрыв факелов пламени (при работе печи на одном виде топлива) может иметь место в результате образования водяных пробок в линиях, зашлакования форсунок, временного прекращения подачи топлива и т. п. Во избежание этого необходимо осуществлять очистку топлива от воды и механических примесей, чистить форсунки в установленные сроки, а также иметь возможность авто-

матически перекрывать топливную линию при обрыве факела, переходить на другой вид топлива или включать приспособление для воспламенения факела при возобновлении подачи топлива.

Взрывы в борове или дымовых каналах происходят в результате неполного сгорания топлива, когда продукты разложения, смешиваясь с подсасываемым через неплотности кладки воздухом, образуют взрывоопасные концентрации, воспламеняющиеся от тлеющих частичек сажи или искр. Практика показывает, что в боровых и дымовых каналах через неплотности кладки может подсасываться до 20% и более воздуха. Во избежание разрушения конструкции печей и боровов при взрыве устраивают предохранительные клапаны шарнирно-откидного и мембранного типа (см. рис. 11).

Б. Прогары теплообменной поверхности происходят в результате совместного теплового и химического воздействия на материал при наличии значительного внутреннего давления в системе.

Химический износ нагретого металла происходит за счет свободного кислорода в продуктах горения и при непосредственном омывании пламенем теплообменной поверхности, а со стороны нагреваемого вещества — за счет взаимодействия продукта или примесей с металлом трубы.

Тепловое воздействие, являющееся главным фактором явления прогара, вызывает сильный перегрев отдельных мест теплообменной поверхности, в результате чего снижается механическая прочность металла, появляются текучесть и необратимые деформации (вспучивание), происходит утоньшение и разрыв стенок с выходом продукта в топочное пространство. Разрыву металла в ослабленном месте способствует повышенное давление нагреваемого продукта в системе. В печах при нагревании горючих жидкостей это обычно заканчивается пожаром, а в паровых котлах — сильными взрывами с разрушением конструкции, при которых возможно возникновение пожара от повреждения систем топливоподачи.

Перегрев отдельных мест теплообменной поверхности происходит в результате сильного уменьшения теплоотдачи от стенки к нагреваемому продукту. Это уменьшение теплоотдачи возникает при отложении на внутренней поверхности накипи (при парообразовании) или продуктов термического разложения в виде кокса (при нагревании органических горючих веществ), а также при снижении уровня нагреваемой жидкости в теплообменных аппаратах, имеющих форму котла, когда пламя и дымовые продукты будут нагревать охлаждаемую жидкостью стенку. Эти возможные случаи представлены на рис. 21.

Черным залиты перегретые участки металла. Из рис. 21 видно, что $K_1 < K_2$, следовательно, $t_1 > t_2$.

Доказать, что $K_1 < K_2$, очень просто. Действительно,

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час град} = \frac{1}{R_{\text{общ}}}.$$

Для случая без загрязнения поверхности:

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}.$$

При наличии загрязнения:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_2},$$

следовательно, $R_1 > R_2$, а $K_1 < K_2$.

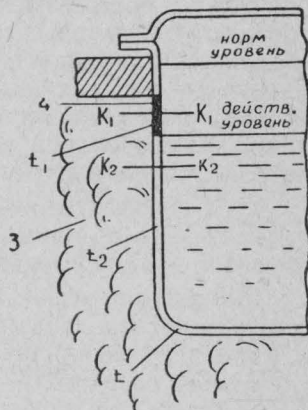
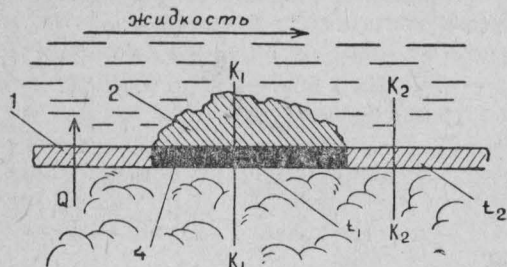


Рис. 21. Места перегрева теплообменной поверхности:

а) при ооксовании; б) при снижении уровня жидкости; 1—теплообменная поверхность; 2—отложения кокса; 3—дымовой канал; 4—перегретые участки.

В случае омывания поверхности стенки нагреваемой жидкостью:

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2'},$$

где: α_2' — коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкости при нормальном уровне.

При понижении уровня жидкости стенку омывает воздух + пар, тогда:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2''},$$

где: α_2'' — коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху.

Но $\alpha_2' > \alpha_2''$, так как теплоотдача от поверхности к жидкости всегда в десятки раз больше, чем от поверхности к газу.

Следовательно, $R_1 > R_2$, а $K_1 < K_2$.

Также просто доказывается, что температура поверхности стенки при увеличении термического сопротивления будет повышаться.

Известно, что при стационарном режиме справедливо следующее равенство:

$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\Delta t_1}{r_1} = \frac{\Delta t_2}{r_2} \text{ и т. д.,}$$

где: Δt — общая разность температур;

$\Delta t_1; \Delta t_2$ и т.д. — разности граничных температур слоев ограждения;

r_1, r_2 и т.д. — термические сопротивления слоев ограждения.

Чтобы найти температуру стенки t_1 , необходимо решить следующее уравнение: $\frac{\Delta t}{R} = \frac{\Delta t_1}{r_1}$, или:

$$\frac{t_{\text{газа}} - t_{\text{жидк}}}{R} = \frac{t_{\text{газа}} - t_1}{r_1},$$

откуда

$$t_1 = t_{\text{газа}} - \frac{r_1}{R} (t_{\text{газа}} - t_{\text{жидк}}).$$

Коэффициенты теплопроводности наиболее частых загрязнений следующие:

накипь в водогрейных котлах: $\lambda = 2-4$ ккал/м час град;

отложения кокса на поверхности: $\lambda = 0,5$ ккал/м час град.

Практика показывает, что случаи прогара труб в печах нефтеперерабатывающей промышленности, а также котлов для заправки олифы и лаков очень часты. Это объясняется интенсивным коксообразованием при нагревании жидкостей до высоких температур и трудностью регулировки температур.

На электростанциях аварии с котлами из-за прогара происходят редко, что объясняется хорошей организацией водоподготовки, тщательным химическим анализом питательной воды для котла и насыщенного пара. Совсем иное дело в котельных промышленных предприятий. За последние годы более 20% аварий котлов произошло из-за неудовлетворительного водного режима, в результате питания их водой непосредственно из источников, без умягчения.

На заводе мясомолочной промышленности в 1947 году произошел взрыв котла системы Шухова (давление 7 атм, поверхность нагрева 35 м²)¹. Под действием возникших реактивных сил котел был сорван с фундамента, и, разрушив перекрытие, упал на территорию завода на расстоянии 91 м от места установки. При осмотре котла были обнаружены выпучины овальной формы и отдушины. Разрыв отдушины произошел по сварным швам, имевшим непровар. На внутренней стороне кипятильных труб была обнаружена накипь толщиной от 4 до 2 мм. Последняя чистка котла производилась за 1,5 года до несчастного случая.

Во избежание прогара необходимо в установленные сроки производить очистку теплообменной поверхности от накипи и отложений. В соответствии с требованиями «Правил устройства и безопасной эксплуатации паровых котлов» (утверждены Госгортехнадзором СССР 19 марта 1957 года) толщина накипи в наиболее теплонапряженных поверхностях нагрева не должна превышать 1 мм для котлов с давлением пара ниже 16 атм и 0,05 мм для котлов с давлением пара от 16 до 22 атм.

Для каждого котла производительностью от 2 т пара/час и выше устанавливаются эксплуатационные нормы качества воды, режим продувки и график останова для чистки.

Необходимо контролировать соблюдение установленного режима температур и не допускать больше предусмотренного нор-

¹ См. «Техника безопасности в промышленности» № 10, 1957.

мами количества свободного кислорода в дымовых газах и коррозионных примесей в нагреваемых продуктах.

В. Пожары у топливных коммуникаций происходят чаще всего в результате утечек топлива через фланцевые соединения, сальники и при переполнении или неисправностях топливного напорного бака. Мероприятия, обеспечивающие предупреждение этих явлений, общеизвестны и не требуют особого рассмотрения.

Глава IV

ОБОГРЕВ СПЕЦИАЛЬНЫМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

В тех случаях, когда обогрев водяным паром не может быть применен из-за малой величины рабочей температуры, а обогрев дымовыми топочными газами недопустим по соображениям пожарной безопасности или из-за невозможности осуществления равномерного обогрева веществ, применяют обогрев специальными теплоносителями. Этот способ применяется для нагревания веществ от 180 до 400°C, а иногда даже выше.

Наиболее часто в качестве теплоносителей применяются органические жидкости, перегретая вода и расплавленные соли. Применение таких способов обогрева требует устройства замкнутой системы с постоянной циркуляцией теплоносителя (рис. 22). Основными элементами такой установки являются: печь 1, где производится нагревание самого теплоносителя, теплообменные аппараты 2, системы трубопроводов, соединяющих аппараты в общую цепь сборника теплоносителя 3 и циркуляционный насос 4. Теплообменная поверхность аппаратов может быть различной.

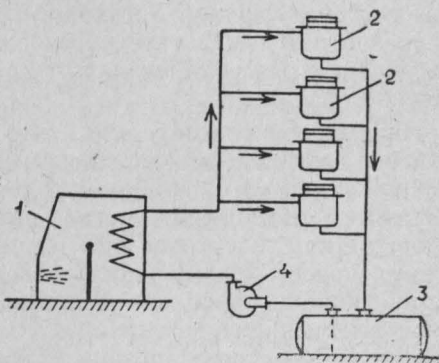


Рис. 22. Схема обогрева жидкими теплоносителями с принудительной циркуляцией.

Теплоносители в печи нагреваются с помощью топочных газов или электрического тока. Циркуляция теплоносителя в системе может быть естественной или принудительной — с помощью насоса.

Рассмотрим характерные особенности некоторых способов обогрева специальными теплоносителями.

Обогрев маслом

Обогрев маслом, как и перегретой водой, применяется для сравнительно мягкого и равномерного нагрева продукта. Обогрев маслом дает возможность достигать рабочих температур до 250°. В качестве

ве теплоносителей используются минеральные масла с удельным весом от 0,85 до 0,94. Нагрев масла обычно производится огнем способом, реже электрическим током.

Аппараты, в которых масло используется как теплоноситель, могут располагаться отдельно от огневой печи или совмещаться с ней. Совмещение теплообменника с огневой печью упрощает установку. Кроме того, наличие между топочными газами и обогреваемой жидкостью слоя масла позволяет осуществлять мягкий обогрев, без перегревов, которые могут быть при обогреве дымовыми газами без масляной бани. В печь с огнем обогревом устанавливается аппарат с масляной рубашкой. Для обеспечения циркуляции масла в системе служат трубопроводы.

За счет теплоты дымовых продуктов масло нагревается до температуры на 15—20°C выше требуемой температуры нагрева продукта. Такая небольшая разница в температурах и обеспечивает мягкость обогрева.

Обогрев маслом представляет значительную пожарную опасность независимо от того, какая жидкость находится в аппарате. Естественно, что пожар может возникнуть только при утечке масла из системы наружу. Утечка масла в помещение или в печь может произойти в результате образования неплотностей и повреждений в рубашке и трубопроводах от прогара, химического износа и повышенного давления.

Тепловой и химический износ поверхности рубашки, подвергающейся воздействию масла, пламени и дымовых продуктов, происходит по тем же причинам, которые рассмотрены выше (стр. 43—46). Заметное разложение масел, при котором возможно ококсование поверхности, наступает при температуре 250—300°C. Как известно, интенсивность ококсования зависит от скорости движения жидкости. Скорость движения масла в системе (особенно при естественной циркуляции) невелика, а в месте максимального прогрева она имеет минимальное значение, так как площадь кольцевого пространства рубашки много больше площади сечения трубопроводов. Снижение скорости циркуляции может произойти при значительных отложениях в трубах и при неполном открытии вентилей.

Повышенное давление в системе при неправильном устройстве или неправильной эксплуатации установки может произойти от расширения масла при нагревании и образования значительного количества паров и газов. Если в период пуска излишек масла из системы не отводить, то в силу несжимаемости жидкостей в трубопроводах образуется очень большое давление, достаточное для разрыва стенки. При нагревании масла под воздействием высокой температуры происходит его частичное испарение, а также разложение с выделением газообразных продуктов. Если этим газам не будет обеспечен беспрепятственный выход из системы, то давление может возрасти, и циркуляция масла вследствие образования газовых пробок ухудшится.

Весьма опасно наличие в масле воды. При нагревании свыше

100°C вода начинает вскипать, вследствие чего давление в системе повышается.

При повреждении рубашки масло, попадая в топочное пространство печи, воспламеняется от открытого огня. При повреждении циркуляционных линий масло будет выходить в производственное помещение, но самовоспламенения не произойдет, так как рабочая температура его не превышает 250—300°, а температура самовоспламенения лежит в пределах 350—400°C. В этом случае воспламенение масла может произойти от тепловых источников, связанных с системой обогрева. Следует иметь в виду, что рабочая температура масла часто бывает выше его температуры вспышки. Следовательно, при попадании его в замкнутые пространства можно ожидать образования взрывоопасных концентраций.

Для того, чтобы избежать возможности возникновения пожара и создать условия для его быстрой локализации, необходимо предусмотреть следующие мероприятия. Конструкция топки должна быть такой, чтобы обогрев производился дымовыми газами, а пламя не касалось теплообменной поверхности, для этого печь должна быть с выносным топливником. Для предотвращения перегревов и окисловывания поверхности необходимо наблюдать за режимом обогрева, то есть наблюдать за температурой топочного пространства и теплоносителя.

Во избежание образования повышенного давления от объемного расширения масла при нагревании система должна иметь расширительный бачок, который может служить и напорным резервуаром при заливке системы маслом, расширитель необходимо соединить с атмосферой посредством дыхательной трубы. Отводная труба должна выходить выше конька кровли и иметь на конце огнепреградитель.

Чтобы при вспенивании масло не выбрасывалось из расширителя, его необходимо снабжать переливным трубопроводом, соединенным со сборником масла. При возникновении аварии или пожара масло из системы должно быть удалено. Для этого необходимо иметь аварийный резервуар, в качестве которого может быть использован сборник масла, если он вынесен из производственного помещения. Система трубопроводов должна иметь уклон в сторону аварийного резервуара.

Для того, чтобы основной источник воспламенения — открытый огонь — изолировать от теплообменных аппаратов, целесообразно нагревание масла производить централизованно в особой печи. Печь для нагревания масла сооружается (располагается) вне производственного помещения.

Если это требование по экономическим или технологическим соображениям не может быть осуществлено и источники огневого обогрева располагаются в производственном помещении, то целесообразно, чтобы топка печей производилась из другого помещения.

Для каждого сорта масла устанавливается максимально допустимая температура нагрева. Как правило, максимальная рабочая

температура должна быть примерно на 50°C ниже температуры самовоспламенения масла.

Пожарная опасность производственного помещения определяется не только наличием системы масляного обогрева, но и пожароопасными свойствами нагреваемого продукта.

Из всего сказанного видно, что обогрев маслом имеет существенные недостатки технологического порядка и значительную пожарную опасность.

Обогрев дифенильной смесью (даутермом)

Недостатки обогрева перегретой водой и маслом заставили техническую мысль работать над изысканием теплоносителей, дающих возможность достигать высоких рабочих температур при небольших давлениях. В то же самое время теплоносители должны быть стойкими против разложения при нагревании. Этим условиям в некоторой мере удовлетворяют такие органические жидкости, как дифенил и дифениловый эфир.

Дифенил является углеводородом ароматического ряда, имеющим формулу $C_6H_5-C_6H_5$. Температура кипения дифенила при нормальном давлении +254,9°, удельный вес 1,04.

Дифенилоксид, или дифениловый эфир, имеет формулу $C_6H_5-O-C_6H_5$. Температура кипения его при нормальном давлении 257,9°, удельный вес 1,08.

Для целей обогрева чаще всего применяется эвтектическая, азеотропная смесь дифенила (26,5%) и дифенилового эфира (73,5%). Эта смесь называется дифенильной смесью, высокотемпературным органическим теплоносителем (ВОТ), даутермом, или динилом.

Дифенильная смесь — бесцветная жидкость с резким характерным запахом, удельный вес — 1,06, температура кипения при атмосферном давлении 260°, пары ее примерно в 5 раз тяжелее воздуха.

Без повышенного давления дифенильная смесь дает возможность достигать рабочих температур до 260°. Предельная рабочая температура 350°. Температура от 260 до 350° достижима лишь при наличии внутреннего давления в системе от 2 до 8,5 атм.

Для обогрева дифенильная смесь применяется в анилино-красочной, химико-фармацевтической, пищевой промышленности, на паросиловых установках, в качестве промежуточного теплоносителя при производстве шелка капрон, лавсан и в др. отраслях промышленности.

Возможности применения этого теплоносителя в промышленности весьма велики.

Обогрев продуктов может осуществляться жидкой дифенильной смесью или ее парами. В обоих случаях смесь нагревается топочными газами или электрическим током. Отдавая свое тепло продукту, она обеспечивает высокую равномерность нагревания без местных перегревов стенок аппаратуры.

В технологических установках (рис. 23) жидкая дифенильная смесь нагревается в печи 1 за счет теплоты дымовых продуктов, затем испаряется в паросборнике и пары ее при температуре 260—370° направляются в рубашки теплообменных аппаратов 2—3. Отдавая свое тепло стенкам аппарата, пары конденсируются. Получающийся конденсат отводится через конденсационные горшки 4 и 5 и холодильник 6 в сборник конденсата 7. Из сборника насосом 8 жидкость снова подается в печь. Рубашки теплообменных

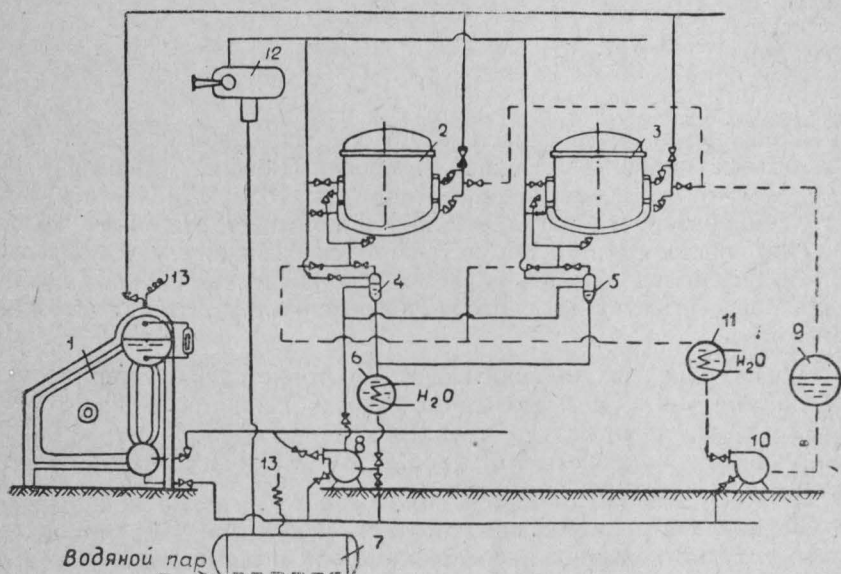


Рис. 23. Схема обогрева парами дифенильной смеси (даутермом):

1—паровой котел; 2, 3—теплообменные аппараты; 4, 5—конденсационные горшки; 6, 11—холодильники; 7, 9—сборники конденсата; 8, 10—циркуляционные насосы; 12—эжектор; 13—предохранительный клапан.

аппаратов для улучшения условий теплообмена разделены на две секции, работающие параллельно.

При необходимости охлаждения аппаратов используется жидкая дифенильная смесь. Для этой цели после отключения обогрева включается система охлаждения. Дифенильная смесь из сборника 9 забирается циркуляционным насосом 10, прокачивается через холодильник 11 и рубашки теплообменных аппаратов. Из рубашек жидкость вновь поступает в сборник.

Применение дифенильной смеси в качестве теплоносителя имеет то преимущество, что даже при длительной работе она не образует на стенках аппарата твердых отложений, а коэффициент ее теплоотдачи выше, чем у масла. Термическая стойкость смеси позволяет эксплуатировать установки длительное время без чистки. Это видно из таблицы 3.

При работе опытной установки под давлением 8 атм и температуре 370° после шести месяцев эксплуатации не наблюдалось видимого разложения смеси.

	Температура				
	345	370	385	400	415
Распад за сутки в %	0,0125 — 0,0175	0,02 — 0,03	0,03 — 0,05	0,19 — 0,25	0,35 — 0,50
Срок службы (в месяцах) до регенерации . . .	45 — 60	25 — 37	10 — 14	3 — 4	1,5 — 2,0

Пары дифенильной смеси несут большой запас тепла: единица объема паров несет тепла немногим меньше (примерно на 25%), чем тот же объем водяного пара. Благодаря гибкости и легкости температурного регулирования и контроля, высокому коэффициенту теплоотдачи и отсутствию ооксовывания труб обогрев парами дифенильной смеси является в большинстве случаев одним из наиболее эффективных способов нагревания веществ при высоких температурах.

Однако при всех положительных достоинствах как теплоносителя дифенильная смесь обладает такими свойствами, как горючесть, высокая температура плавления и способность легкой диффузии через прокладочные материалы. Это необходимо иметь в виду при анализе пожарной опасности.

Дифенильная смесь представляет собой горючую жидкость с температурой вспышки паров около 102°C и температурой самовоспламенения в пределах 500—550°C. Горит коптящим пламенем. Теплотворная способность около 8000 ккал/кг. Обладает достаточно большой термической стойкостью. Термическое разложение ее с образованием газообразных и твердых продуктов начинается в пределах 385—400°C.

При разложении дифенильной смеси образуются газообразные продукты (водород, кислород, углекислый газ, окись углерода), жидкие вещества (главным образом ксилольные фракции) и небольшое количество углерода.

Дифенильная смесь имеет высокую температуру кристаллизации, уже при +12° эта жидкость превращается в твердое вещество, а ее составляющие имеют температуру застывания еще более высокую. Так, например, температура застывания дифенила равна +69°C, а дифенилоксида +27°C. Застывание смеси сопровождается уменьшением ее объема.

При испарении в процессе длительной работы состав дифенильной смеси не изменяется, так как концентрация паровой фазы для азеотропных растворов всегда равна концентрации жидкости. Следовательно, пожароопасные свойства ее со временем тоже не изменяются.

При нормальной циркуляции дифенильной смеси в системе не может возникнуть больших давлений даже при перегревах, так как упругость паров ее небольшая, что видно из таблицы 4.

Таблица 4

	200°	300°	400°	500°
Вода	15,9 атм	87,6 атм	168,6 атм	—
Дифенильная смесь	0,25 „	2,4 „	5,3 „	10,6 атм

По сравнению с другими органическими жидкостями дифенильная смесь обладает значительно большей диффузионной способностью.

Из рассмотренных выше физико-химических свойств дифенильной смеси видно, что при обогреве ею могут иметь место повреждения системы вследствие образования пробок в линии, а также утечки смеси через неплотности и через прокладочные и набивочные материалы.

Пробки в линиях могут образоваться при временном останове системы без опорожнения трубопроводов от жидкости или при неполном их опорожнении. Низкая температура окружающей среды (особенно зимой или осенью) может привести к снижению температуры в трубах до $+12^{\circ}\text{C}$, что неизбежно вызовет кристаллизацию дифенильной смеси и образование в линии пробок. Застывание смеси само по себе не вызывает повреждений труб, так как, застывая, она уменьшается в объеме, но наличие пробок исключает возможность циркуляции жидкости по трубам при последующем пуске установки. Неподвижность теплоносителя создает благоприятные условия для перегрева дифенильной смеси в котле и ее разложения. Разложение сопровождается выделением значительного количества газообразных и твердых продуктов.

Газообразные продукты резко превышают давление в системе, а твердые продукты, отлагаясь на теплообменной поверхности печи, являются причиной быстрого перегрева стенок. Все эти явления в совокупности приводят к прогару труб. Такие случаи встречаются в практике.

На одном заводе была смонтирована установка, работающая на жидкой дифенильной смеси. Установка успешно прошла пробное испытание и готовилась для сдачи в эксплуатацию. Был назначен срок приемки ее межведомственной комиссией. Накануне назначенного срока установку еще раз опробовали, но по окончании работы жидкость не спустили из системы. Снижение температуры воздуха ночью привело к сильному охлаждению трубопроводов и к застыванию в них дифенильной смеси. Попытка на следующий день пустить установку в действие (при отсутствии циркуляции в линии) привела к прогару труб печи, изливу теплоносителя в печь и возникновению пожара.

Чтобы избежать возможности образования пробок дифенильной смеси в трубопроводах необходимо обеспечить условия для полного спуска жидкости из системы. Для этого все трубопроводы должны

иметь уклон в сторону сборника и не должны иметь «мешков». Там, где невозможно осуществить необходимый уклон и имеется вероятность скопления жидкости, нужно требовать устройства спускных пробок.

При пуске установки строго следят за циркуляцией теплоносителя в системе, за температурными режимами печи и теплообменных аппаратов. Несоблюдение температурного режима печи и снижение скорости циркуляции может привести к перегреву пограничных слоев теплоносителя выше 400° и к их разложению.

Печи для нагревания дифенильной смесью снабжаются приборами-автоматами для регулирования количества сжигаемого топлива при изменении температуры или давления в системе, а также приборами для автоматического выключения горелок при понижении уровня жидкости в барабане паросборника котла ниже допустимого предела.

Нарушению нормальной циркуляции дифенильной смеси в системе может способствовать наличие в трубопроводах воздуха и других газообразных продуктов. Для полного удаления воздуха и газов в момент пуска установки имеется отсасывающее приспособление в виде пароструйного эжектора.

Дифенильная смесь не действует химически на сталь, чугун, медь, латунь, бронзу, никель и др. В вырезанной трубе опытной установки не обнаружено следов коррозии, поверхность имела вороненый вид. Следовательно, трубопроводы могут быть выполнены из обычной стали. Наиболее уязвимыми местами трубопроводов и аппаратуры являются фланцевые и сальниковые соединения.

Обладая большой диффузионной способностью, дифенильная смесь легко пропитывает обычные мягкие прокладочные и сальниковые материалы (паронит, асбест и др.) и почти беспрепятственно выходит в производственное помещение. Чтобы избежать этого, соединения труб надо делать сварными. В тех монтажных узлах, где наличие фланцевых соединений неизбежно, нужно применять металлические прокладки (например, мягкая сталь, медь, но не свинцовые). Устройства сальниковых соединений нужно вообще избегать. Вместо обычных вентилях применяются сильфонные бессальниковые вентили. Вентиль, у которого вместо сальника имеется тонкая гофрированная латунная трубка (сильфон), обеспечивает полную герметичность.

Перед пуском в работу установка должна проходить гидравлическое испытание на пробное давление в два раза больше рабочего давления.

Для обнаружения незначительных неплотностей рекомендуется производить испытание системы путем заполнения ее аммиаком под давлением $0,7 - 1,0$ атм и опрессовывания сжатым воздухом при половинном рабочем давлении. При этом швы и соединения проверяют на плотность поднесением тряпки, пропитанной слабым раствором соляной кислоты или фенолфталеином. В случае утечки аммиака образуется белое облачко хлористого аммония.

В процессе эксплуатации утечка дифенильной смеси также может быть легко обнаружена благодаря резкому запаху смеси.

Трубопроводы обеспечиваются температурными компенсаторами и теплоизоляцией из негорючих материалов. Печь для нагревания дифенильной смеси выносится из производственного помещения.

Установка должна иметь возможность аварийного слива теплоносителя из системы. В качестве аварийной емкости может быть использован сборник установки, в этом случае он должен быть вынесен из производственного помещения или отделен brand-мауером.

Помещение, где расположены нагревательные печи, по степени пожарной опасности относится к категории производств Г, а помещения, где расположены подогреватели, — к категории производств Б, если в них не нагреваются вещества более опасные в пожарном отношении, чем дифенильная смесь.

ЛИТЕРАТУРА

А. Г. Касаткин. Основные процессы и аппараты химической технологии. Госхимиздат, 1955.

М. В. Алексеев, В. М. Смирнов. Пожарная профилактика в технологических процессах, связанных с обращением горючих и легковоспламеняющихся жидкостей. Изд. МХХ РСФСР, 1955.

А. Н. Лейбо. Печи нефтеперерабатывающих заводов. Гостоптехиздат, 1950.

С. С. Берман. Форсунки и мазутное хозяйство горячих цехов. Гостоптехиздат, 1950.

П. Г. Романков и К. Ф. Павлов. Сборник примеров и задач по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». Госхимиздат, 1947.

Г. Г. Рабинович и др. Процессы и аппараты в нефтеперерабатывающей промышленности. Гостоптехиздат, 1952.

М. А. Железнякова, Е. П. Ключева. Устройство и эксплуатация газового хозяйства коммунальных предприятий. Изд. МХХ РСФСР, 1955.

Г. Ф. Кнорре. Топочные процессы. Госэнергоиздат, 1951.

М. М. Шеголев. Топливо, топки и котельные установки. Госиздат, 1953.

А. В. Чечеткин. Выхотемпературные органические теплоносители. Госэнергоиздат, 1957.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. Общие сведения о процессах нагрева. Теплоносители и технические способы нагревания	3
Глава II. Нагревание водяным паром и горячей водой	6
Нагрев острым паром	7
Нагрев глухим паром	8
Расчет паровых подогревателей	11
Пожарная опасность теплообменников	16
Глава III. Обогрев топочными газами и пламенем	21
Печи для нагревания негорючих твердых веществ	23
Печи для нагревания жидкостей и газов	24
Системы подачи и сжигания топлива в печах	27
Подогрев воздуха, потребного для сжигания топлива	33
Рециркуляция дымовых газов	34
Беспламенное (поверхностное) сжигание топлива	34
Расчет огневых печей	35
Пожарная опасность печей	42
Глава IV. Обогрев специальными высокотемпературными теплоносителями	47
Обогрев маслом	47
Обогрев дифенильной смесью (даутермом)	50

Михаил Васильевич АЛЕКСЕЕВ

ПРОЦЕССЫ НАГРЕВА

Редактор инженер-подполковник Смирнов В. М.

Редактор издательства инженер-полковник Калашников К. А.

Сдано в набор 9/IX—1959 г.

Подписано к печати 25/XII—1959 г.

Г-341173

Зак. 370

Формат бумаги 60 × 92¹/₁₆.

3,5 печ. л.

3,25 уч.-изд. л.

Цена 1 р. 15 к.

Типо-литография ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского