

ТЕХНИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД. ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
К УЧЕБНОМУ ПОСОБИЮ

Учебное пособие

Владимир Иванович Ивановский
Технический углерод.
Процессы и аппараты.
Дополнительные материалы

*http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=29772529
SelfPub; 2018*

Аннотация

В книге рассмотрены наиболее актуальные для производителей технического углерода процессы: применение циркониевых огнеупоров в реакторах для получения техуглерода; обеспечение высокотемпературного нагрева воздуха, подаваемого в реакторы, и использование отходящих газов, образующихся при производстве техуглерода.

Введение.

В учебном пособии, изданном ранее, недостаточно полно были отражены некоторые важные материалы. Прежде всего, это касается использования новых огнеупоров с температурой применения более 2000°C .; применения отходящих газов производства техуглерода для сушки гранулированного техуглерода; внедрения новых типов воздухоподогревателей и улучшение работы действующих; изменения в системах улавливания и газотранспорта. Наиболее существенные результаты получены за счёт внедрения циркониевых огнеупоров с температурой применения до 2200°C . В связи с тем, что дополнительные материалы к учебному пособию (так же как и само пособие) рассчитаны, в основном, на технических работников заводов по производству технического углерода, в материалах кратко освещаются периоды развития отдельных направлений в совершенствовании технического состояния предприятий по производству техуглерода и отрасли техуглерода в целом.

1. Значение огнеупоров в промышленности технического углерода.

Производство техуглерода относится к высокотемпературным процессам, поэтому огнеупоры являются важнейшим элементом оборудования для производства технического углерода. До начала 60-х годов прошлого века в нашей стране выпускался низкодисперсный техуглерод (сажа)

при температурах в печах—1200-1300⁰С. Понятно, что при таких температурах особых требований к огнеупорам не предъявлялось, использовался обычный шамотный кирпич стандартных размеров. Протекторные марки техуглерода с удельной поверхностью 80-85 м²/г. (ПМ-70 и ПМ-70А) начал производить первым в стране Омский завод технического углерода в 1961 году. Эти марки техуглерода отличались высоким качеством и экспортировались в Германскую демократическую республику, во Вьетнам и на Кубу. Однако эффективность такого процесса была низкой, выход техуглерода из сырья составлял всего 23 – 25%.

Получение техуглерода производилось в цилиндрических реакторах, куда подавалось чистое коксохимическое сырьё (антраценовое масло и антраценовая фракция), которое сжигалось при недостатке воздуха при температуре в реакторе 1390-1420⁰С. Естественно, при остановках реакторов температура могла подниматься и выше, поэтому для футеровки этих ректоров применялись динасовые огнеупоры с температурой применения 1600⁰С. Однако эти огнеупоры отличались невысокой термостойкостью, так как изготавливались из окиси кремния (SiO₂). Они не выдерживали резких перепадов температур, но тогда это были лучшие огнеупоры для футеровки реакторов. Основное требование, предъявляемое к этим огнеупорам, состояло в том, чтобы они выдерживали температуру, которая создаётся в реакторе при получении техуглерода.

В середине 60-х годов было построено несколько новых заводов по производству техуглерода (Сызранский, Волгоградский и др.), оснащённых с учётом зарубежного опыта циклонными реакторами, в которых камера горения и зона реакции были разделены. Этот процесс уже принципиально не отличался от современного. Нужно было увеличивать температуру в камере горения для повышения выхода техуглерода, а также увеличивать температуру и в зоне реакции для получения более дисперсных марок техуглерода. Это потребовало поиска огнеупоров с более высокими значениями огнеупорности и термостойкости. Были испытаны различные виды огнеупоров, большинство из них разрушались через 3-4 месяца эксплуатации из-за низкой термостойкости. Удовлетворительный результат показали только муллитокорундовые огнеупоры с содержанием окиси алюминия 62%. В 70-е годы промышленность огнеупоров начала производить муллитокорундовые огнеупоры с содержанием Al_2O_3 73%, затем 83%, и в конце 80-х годов содержание окиси алюминия в муллитокорундовых огнеупорах было увеличено до 85-90%. Для промышленности техуглерода Семилукским огнеупорным заводом выпускались набивные массы МКС-85 и КС-90 с содержанием Al_2O_3 соответственно 85 и 90%. Огнеупорные блоки, изготовленные из этих масс, применялись в 90-е годы на всех отечественных заводах техуглерода. Большинство заводов применяло массу КС-90, содержание окиси алюминия в которой составля-

ло 87—90%.

По регламентам Всесоюзного Научно-исследовательского Института технического углерода (ВНИИТУ) допустимая температура применения огнеупоров, изготовленных из этой массы, ограничивалась величиной 1550 °С. При температуре в камерах горения реакторов 1530-1550 °С выход техуглерода N220 из сырья составлял не более 47% даже при применении чистого коксохимического сырья. Средний выход техуглерода по Омскому заводу технического углерода не превышал 54%. Увеличение среднего выхода по сравнению с выходом техуглерода N220 объясняется тем, что полуактивный (каркасный) техуглерод N550 за счёт мероприятий, внедрённых в 90-е годы, имел выход 60-61%/1.7.1/.

На других заводах техуглерода выход был ещё ниже, а на Волгоградском, использующем технологию ВНИИТУ вплоть до конца 2006 года, выход техуглерода серий 200 и 300 составлял всего 42%. Положение было исправлено только после приобретения фактически обанкротившегося завода собственником Омского ЗТУ, после чего на этом заводе была внедрена технология получения техуглерода, разработанная специалистами Омского ЗТУ. Необходимо отметить, что выход техуглерода из сырья на ведущих зарубежных фирмах Cabot и Degussa был существенно выше уровня выхода на отечественных заводах и составлял для протекторных марок техуглерода 55-61%. Одной из основных причин такой разницы в выходе техуглерода являлось ис-

пользование зарубежными фирмами для футеровки реакторов огнеупоров с более высокой температурой применения (до 1850°C .) – корундовых огнеупоров с содержанием окиси алюминия 99% и хромкорундовых огнеупоров /1.7.2/. Фактически разность температур в камерах горения зарубежных и отечественных реакторов достигала 300°C ., что и обусловило такую большую разницу в выходе техуглерода из сырья. Если взять наиболее распространённую марку протекторного техуглерода N220, то разница в выходе составляла примерно 8%, а это означает, что для выпуска 1т. техуглерода этой марки зарубежными фирмами затрачивалось на 14,3% меньше сырья, чем на лучших наших заводах. Такое положение сложилось потому, что неправильно была определена максимальная температура применения огнеупоров, изготавливаемых из массы КС–90. Конечно, она значительно уступала по температуре применения 99% корунду, но не на такую же величину (300°C). Устанавливая максимальную температуру применения огнеупоров, изготавливаемых из КС-90, Институт ориентировался на температуру начала деформации под нагрузкой 0,2МПа, которая по данным изготовителя – Семилукского завода огнеупоров составляла 1620°C ., отсюда и появилась в регламентах норма, ограничивающая температуру в зоне горения реактора температурой 1550°C . Как показал расчёт, проведённый специалистами ОЗТУ, такой нагрузки на огнеупоры в реакторах нет, она значительно ниже, следовательно, этот показатель при при-

менении огнеупоров в промышленности техуглерода не должен учитываться. Поэтому в 90 х годах температура в камерах реакторов ОЗТУ была повышена до 1590-1620⁰С., что позволило увеличить выход техуглерода протекторных марок примерно на 1,0–1,5%.

Понятно, что этого было недостаточно, поэтому во избежание проигрыша в конкурентной борьбе на внешнем рынке требовалось применять огнеупоры, не уступающие по основным параметрам (огнеупорности, термостойкости) огнеупорам, применяемыми зарубежными фирмами по производству техуглерода. Для промышленности техуглерода такие огнеупоры в то время на отечественных заводах не выпускались, поэтому специалисты Омского ЗТУ провели совместные работы с Верхнепышменским опытным огнеупорным заводом и Богдановичским заводом огнеупоров по получению и применению огнеупоров с содержанием 96–99% корунда(Al_2O_3). Сначала корундовая масса была изготовлена на Верхнепышменском заводе, а затем на Богдановичском заводе огнеупоров, откуда ОЗТУ получает корундовую огнеупорную массу и в настоящее время. Верхнепышменский опытный огнеупорный завод изготавливает для Омского ЗТУ хромкорундовую набивную массу с содержанием окиси хрома (Cr_2O_3) до 12% масс. Работы по получению и применению корундовой массы были закончены в 2001 году, в этом же году был запущен и первый реактор, футерованный блоками из корундовой массы Верхнепышмен-

ского завода. В результате использования корундовых огнеупоров с содержанием окиси алюминия (Al_2O_3) >99% удалось повысить температуру в камерах горения реакторов с 1590-1620⁰С. до 1840–1850⁰С, что позволило увеличить выход техуглерода из сырья по заводу с 56% в 2001 году до 60,1% в конце 2003 года. При этом основной эффект был получен за счёт повышения выхода наиболее ценных протекторных марок техуглерода.

Как показали проведённые в дальнейшем балансовые испытания, при замене в камерах горения огнеупоров с содержанием окиси алюминия 87–90% корундовыми огнеупорами с содержанием окиси алюминия 99% увеличение выхода техуглерода из сырья для протекторных марок техуглерода серии 300 (N326) составило 6,5%, что соответствует уменьшению расхода сырья на производство на 11% . Это очень важно ещё и потому, что сырьё для производства техуглерода является не только дорогим, но и дефицитным продуктом.

Внедрение этого мероприятия позволило заводу по эффективности использования сырья выйти на уровень ведущих мировых производителей техуглерода и значительно опередить отечественных производителей. Так, основной конкурент Омского завода Ярославский ЗТУ первую партию корундовых огнеупоров приобрёл за рубежом у фирмы Дюко (DUKO) из Германии, что конечно не решало проблемы, тем более, что температуру в камере горения реактора они поддерживали не выше 1680⁰С., хотя применяемые огнеупо-

ры содержали 99,3% окиси алюминия/1.7.4.стр.217/. Учитывая время издания источника /1.7.4./– конец 2002 года, можно сделать вывод, что в 2002 году температуру в камерах горения реакторов выше 1680⁰С. на Ярославском заводе ещё не повышали. Объяснить это можно только всё той же путаницей, когда за максимальную температуру применения принимают температуру начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа. В спецификации Дюко эта температура составляет 1700 ⁰С., отсюда и температура в камере горения. В последующем Ярославский ЗТУ совместно с ОАО Поликор (г. Кинешма) организовал производство огнеупоров с содержанием окиси алюминия 98% и увеличил температуру в камерах горения реакторов. Другие заводы внедрили такие огнеупоры ещё позднее. Волгоградский завод техуглерада вообще не занимался внедрением корундовых огнеупоров до смены собственника (конец 2006 года). Что касается заводов СНГ, то самый крупный завод Украины Кременчугский завод технического углерода ещё в апреле 2005 не имел корундовых огнеупоров с содержанием окиси алюминия 96-99%. Для этого завода ещё только разрабатывался огнеупорный бетон с температурой применения 1800-1850 ⁰С./1.7.5. стр.34/. Здесь необходимо остановиться на свойствах огнеупоров.

1.1. Краткие сведения об огнеупорах.

В соответствии с международным определением огнеупорами называют неметаллические керамические материалы,

содержащие некоторое количество металлов /1.7.6./. Обще-признано, что о материалах говорят как об огнеупорных, если они эксплуатируются при температурах от 600 до 2000⁰С. в печах и агрегатах различных отраслей промышленности. Основу огнеупорных материалов составляют шесть базовых оксидов – SiO₂; Al₂O₃; CaO; MgO; Cr₂O₃ и ZrO₂, или точнее их соединения. Во всех огнеупорах, применяемых в промышленности техуглерода, они содержатся, за исключением MgO. По отечественной классификации в соответствии с ГОСТ 4385 изделия огнеупорные подразделяются на:

Огнеупорные – от 1580⁰С. до 1770⁰С.

Высокоогнеупорные – от 1770 до 2000⁰С.

Высшей огнеупорности – выше 2000⁰С.

Различают 3 основных типа огнеупорной продукции:

- формованные огнеупоры, изготавливаемые прессованием (готовые огнеупорные изделия);
- Неформованные огнеупоры (смеси для футерования и ремонта, а также для изготовления нестандартных блоков);
- Теплоизоляционные материалы.

Омский завод техуглерода использует все типы этих огнеупоров, но определяющей продукцией являются неформованные огнеупоры – блоки, изготавливаемые на заводе из огнеупорных масс (порошков). Вся огневая поверхность реакторов футерована такими блоками. Для огнеупоров, находящихся в непосредственном контакте с высокотемпературными газами, главными требованиями являются высокая огне-

упорность и высокая термостойкость.

Огнеупорностью называют свойство материалов противостоять, не расплавляясь, воздействию высоких температур.

Под термостойкостью понимают способность огнеупорных изделий сохранять целостность при резких колебаниях температуры.

Вообще огнеупоры могут подвергаться большому количеству различных испытаний. По международным стандартам ASTM и DIN предусмотрено 25 испытаний для определения различных характеристик огнеупоров. Большинство из них не имеют существенного значения для нашей отрасли, поэтому необходимо подробнее разобраться с огнеупорностью и термостойкостью используемых в промышленности техуглерода огнеупоров. Огнеупорность характеризует температуру, при которой огнеупор начинает размягчаться. Для определения огнеупорности используют температуру падения пирометрических конусов/1.7.6./.. Эта температура может быть близка к температуре плавления применяемого материала. Так, температура плавления Al_2O_3 составляет $2050^{\circ}C$., а огнеупорность набивной массы (порошка) корунда Богдановичского завода с содержанием $Al_2O_3 >99\%$ составила $2030^{\circ}C$., определение проводилось «УКРНИИО им. А.С. Бережного» по просьбе специалистов ОЗТУ.

Понятно, что чем выше огнеупорность, тем выше и допустимая температура применения огнеупоров. Однако это не означает, что огнеупорные блоки, изготовленные из этой

массы, могут эксплуатироваться при температуре близкой к значению показателя огнеупорности материала. Во-первых, огнеупорность определяется когда образцы (конусы) находятся в свободном состоянии и не испытывают никакого постороннего воздействия. Во-вторых, огнеупорность может изменяться в связи с изменением состава массы даже в пределах спецификации, а определяется она поставщиком крайне редко или совсем не определяется. Кроме того, огнеупорность определяется при использовании точных термопар, а при получении техуглерода используются пирометры, которые дают существенные искажения. Температура, измеренная пирометром, всегда ниже действительной температуры. То есть если, например, пирометр показывает 1950°C ., то действительная температура может достигать 1990°C . и выше. Изготовители огнеупоров как российские, так и зарубежные показатель огнеупорности в спецификации не включают, не указывается в них и температура, при которой огнеупоры можно эксплуатировать (температура службы огнеупоров по зарубежной классификации). Для огнеупоров, которыми футеруются реактора заводов по производству технического углерода, температура службы огнеупоров указывается в докладах фирм изготовителей огнеупоров на международных конференциях по техуглероду (Carbon Black World), но эти доклады имеют рекламный характер. Для изделий из неформованных огнеупорных материалов из корунда максимальная температура службы

по зарубежным данным составляет 1800°C . /1.7.6. стр. 177, 181/. В спецификациях изготовителей огнеупоров как российских, так и зарубежных, в которых изготовители гарантируют качество своей продукции, указан только один температурный показатель—температура начала деформации под нагрузкой $0,2\text{МПа}$. Она, как правило, составляет $1650\text{--}1700^{\circ}\text{C}$. для корундовых огнеупоров с содержанием Al_2O_3 99%. Эта температура примерно на 150°C ниже максимальной температуры службы огнеупоров (температуры применения по российской классификации), определённой опытным путём. Ранее уже сообщалось о тех последствиях для промышленности технического углерода, когда температуру деформации под нагрузкой $0,2\text{МПа}$ принимали за температуру применения огнеупоров. Следует отметить, что помимо того, что в реакторах для получения техуглерода нет такой нагрузки, так ещё этот показатель определяется за рубежом только для огнеупоров, работающих в восстановительной среде /1.7.6./ (стр. 319), что не может иметь никакого отношения к камерам горения реакторов для получения техуглерода. Отсюда следует, что температура применения огнеупоров должна определяться потребителем с учётом огнеупорности материала, его температуры применения по справочным данным, учётом погрешности средств измерений и условий эксплуатации. Не смотря на то, что в спецификации Богдановичского огнеупорного завода на набивную корундовую массу была указана только температура деформации

под нагрузкой 1750⁰С., Омский ЗТУ сразу же после получения массы установил температуру её применения в пределах 1830–1850⁰С., обоснованность этого решения подтвердилось в процессе эксплуатации огнеупоров. При аварийных ситуациях выяснилось, что при температурах 1880–1890⁰С. огнеупоры начинают плавиться. На заводах техуглерода максимальную температуру применения огнеупоров для условий любого завода определить несложно перед остановкой реактора на капитальный ремонт.

Другим важным свойством огнеупоров, применяемых в промышленности технического углерода, является термическая стойкость (термостойкость). Как уже отмечалось, под термостойкостью понимают способность огнеупоров сохранять целостность при резких колебаниях температуры. Другими словами, способность выдерживать резкие колебания температуры не растрескиваясь и не разрушаясь. Растрескивание или разрушение огнеупорных изделий при резких изменениях температуры объясняется возникновением в них напряжений при увеличении или уменьшении объёма. При нагревании температура наружных слоёв огнеупорных изделий значительно выше, чем внутренних, причём эта разница тем больше, чем выше скорость подъёма температуры при нагревании. Под влиянием термического расширения при нагревании, то есть увеличении объёма, наружные слои огнеупорных изделий расширяются значительно больше, чем холодные слои внутренней их части, при этом в определён-

ных слоях огнеупорных изделий появляются скалывающие напряжения и, если по своей величине они превосходят силы сцепления частиц изделий между собой, то в них появляются трещины и отколы. При охлаждении наружные слои остывают быстрее, чем внутренние, причём уменьшение объёма наружных слоёв всегда происходит с опережением изменения объёма внутренних, более нагретых слоёв. Возникающие при этом растягивающие напряжения так же приводят к растрескиванию и разрушению огнеупоров. Термостойкость огнеупорного изделия определяется количеством теплосмен, то есть количеством попеременных нагревов до 1300°C . и охлаждения в проточной воде до потери 20% веса первоначального образца вследствие его растрескивания. Термостойкость огнеупорных изделий в основном зависит от их структуры и природы исходного сырья, причём, чем меньше происходит изменение объёма огнеупорных изделий при резком нагревании и охлаждении, тем выше их термостойкость.

Для заводских технологов самое главное не допускать таких резких изменений температуры, принимая соответствующие меры при аварийных ситуациях. Необходимо также строго соблюдать графики разогрева реакторов, инструкции по пуску и остановке технологических потоков, не допускать попадания воды на футеровку. Что касается самого значения термостойкости, то 99%ый корунд имеет высокую термостойкость—более 30 теплосмен/1.7.7./.. Для сравнения ша-

мотные огнеупоры выдерживают только 6 теплосмен, а муллитокорундовые с содержанием окиси алюминия 90%—12 теплосмен/1.7.7./ . Кроме того, в этом же источнике указывается, что неформованные огнеупоры имеют меньший коэффициент объёмного расширения и более высокую термостойкость, то есть это непосредственно относится и к огнеупорам, изготавливаемым на заводах техуглерода. Это же отмечается и в источнике/1.7.9./ .

В современных реакторах по получению техуглерода в смесительном сопле развивается скорость газов 500м/сек и выше, поэтому в этой зоне реактора огнеупоры подвергаются эрозии, то есть поверхностному разрушению (в прямом переводе с латинского – разъеданию). Считается, что эрозионное разрушение можно значительно уменьшить, применяя в переходной втулке хромистый корунд /1.7.7./ . Это же отмечается и в зарубежной информации по огнеупорам. Однако по данным источника/1.7.6./ бетон из хромистого корунда имеет такое же значение истираемости, как и бетон на основе корунда. Устойчивость к истиранию определялась по DIN EN 102. Омский ЗТУ использовал хромистый корунд с содержанием 12% окиси хрома в переходных втулках реакторов с целью исключить контакт чистого корунда с цирконием, что приводит при определённых условиях к образованию оплава в месте контакта разнородных блоков. Причины этого будут подробно объяснены в следующем разделе. Основной цели удалось добиться, но оказалось, что блоки

из хромистого корунда подвергались такой же эрозии, что и чистый корунд. Почему это происходит пока не ясно, но это необходимо установить. Хромистый корунд изготавливает для Омского завода Верхнепышменский опытный завод огнеупоров. Огнеупорность набивной массы (порошка) определена УКРНИИО и она составила 2125°C ., что позволяет применять такие огнеупоры при температуре $1900\text{--}1920^{\circ}\text{C}$. Применение этих огнеупоров в переходных втулках реакторов и в начальной части зоны реакции должно снизить вероятность разрушения огнеупоров реакторов при авариях. Особенно это важно в связи с необходимостью дальнейшего повышения температуры в камерах горения реакторов. В отношении эрозии нужно добавить, что она не может отразиться на работе реактора, если геометрические размеры втулки не изменились.

Внедрение корундовых огнеупоров на разных заводах занимало различное время. Заводы, имеющие собственные участки по изготовлению огнеупоров, могли это сделать значительно быстрее. В связи с тем, что при футеровке камер горения реакторов нельзя было использовать стандартные огнеупоры, на опытном производстве ВНИИТУ был организован участок по изготовлению огнеупорных блоков из муллитокорундовой массы. Это было правильное решение, которое оказало значительное влияние на работу заводов, перенявших этот опыт. На Омском ЗТУ такой участок был построен в 1992 году и неоднократно модернизировался, со-

вершенствовался весь процесс изготовления огнеупоров— помол, смешение, трамбовка, сушка; был введён предварительный обжиг огнеупоров, что повысило их качество, усовершенствован и сам процесс обжига огнеупоров в реакторах.

Это позволило заводу полностью обеспечить себя огнеупорами для реакторов требуемого качества, а также использовать в значительных количествах корундовый лом, что существенно снижает потребность в покупных материалах для изготовления огнеупоров. Переоборудование реакторов, в том числе и реакторов серий 500 и 600 было проведено в течение 2х лет, что без участка по изготовлению огнеупоров было бы невозможно. Невозможно бы было быстро изменять конструкции реакторов, быстро проводить местные ремонты. Что касается конструкций реакторов, то реактора для производства каркасных марок техуглерода уже и внешне отличаются от реакторов ВНИИТУ—увеличены диаметры всех зон реактора, объёмы камер горения и реакции значительно увеличены, применяется только аксиальная подача сырья, полностью изменена и зона закалки. На этих реакторах производится техуглерод серий 500 и 600, тогда как на реакторах конструкции ВНИИТУ можно было получать только техуглерод серии 500 и то с удельной поверхностью на верхнем пределе ГОСТ. Принципиальные решения в отношении конструкции этих реакторов было принято ещё в конце 90х годов /1.7.1. стр.55./. В последующем

на отдельных реакторах были проведены работы по дальнейшему увеличению объёмов зон реакции и закалки с целью увеличения производительности реакторов, объёмы камер горения тоже были увеличены, для подачи газов в реактор используется четыре горелки. Более существенным изменением стало подача в реактор всего объёма сырья аксиально через центральную форсунку. Для производства техуглерода серии 700 используется вертикальный реактор заводской конструкции. В производствах активных (протекторных) марок техуглерода конструкция реактора для получения активных марок техуглерода существенно не изменилась по сравнению с реактором конструкции завода, указанном в источнике /1.7.1. стр.58./. Главное усовершенствование реактора это применение циркониевых огнеупоров. Это гораздо важнее любых конструктивных изменений. Кроме того, произведена унификация реакторов, все они имеют одинаковую конструкцию, что очень важно для многотоннажного производства. Необходимо только увеличить диаметр вертикальной части реактора для уменьшения содержания полиароматических углеводородов (ПАУ) на поверхности техуглерода и увеличения нагрузки реактора по сырью, например, до 1600мм.

1.2. Применение циркониевых огнеупоров в реакторах для получения техуглерода.

Для дальнейшего повышения выхода техуглерода из сы-

рья требовалось ещё более значительное повышение температуры в зонах горения реакторов, что можно было обеспечить только при применении огнеупоров с более высокой огнеупорностью и хорошей термостойкостью. Такими в настоящее время являются только циркониевые огнеупоры/1.7.5./, /1.7.7./.

Циркониевые огнеупоры на основе окиси циркония (ZrO_2) имеют высокую огнеупорность— 2300-2400⁰С. В применении таких огнеупоров были заинтересованы многие отрасли промышленности, использующие высокотемпературные процессы, однако низкая термостойкость не позволяла применять их в чистом виде, так как при перепадах температур, которые неизбежны в промышленных аппаратах, они быстро разрушались. Термостойкость циркониевых огнеупоров удалось повысить за счёт стабилизирующих добавок: MgO, CaO, Y_2O_3 и др. Добавка к стабилизированному диоксиду циркония 10-12% моноклинной составляющей повышает термостойкость до 25 теплосмен. Это подробно изложено в источниках /1.7.5./ и /1.7.7./. Из изложенного ясно, что такие огнеупоры могут применяться в промышленности технического углерода, однако выяснилось, что в России такие огнеупоры не производились, не смотря на наличие крупного месторождения в Мурманской области. Обращение специалистов ОЗТУ к известным зарубежным изготовителям огнеупоров тоже не дали результатов. Положение изменилось только после обращения в «Украинский науч-

но-исследовательский институт им. А.С. Бережного» Этот институт ещё в Советское время занимался разработкой огнеупоров для промышленности технического углерода.

В соответствии с заключённым в январе 2003 года договором с ОАО «Техуглерод» (Омским ЗТУ) ОАО «УкрНИИО им Бережного» разработал набивную массу и мертель из диоксида циркония на фосфатной связке, стабилизированной окисью иттрия (Y_2O_3) для температуры применения до $2400^{\circ}C$. Изготовление огнеупорных циркониевых блоков производилось на заводском участке по изготовлению огнеупоров.

Первый реактор с камерой горения из циркониевых блоков был запущен в начале ноября 2003 года и эксплуатировался 2 года и 7 месяцев без ремонта при средней температуре в камере горения $1940^{\circ}C$. Это был первый промышленный реактор, камера горения которого была футерована циркониевыми огнеупорами, причём, не только в отечественной промышленности, но и мировой промышленности техуглерода. В последующие годы на мировых конференциях по техуглероду (Carbon Black World) появились материалы по реакторам с футеровкой камеры горения из циркониевых огнеупоров, но это были только предложения изготовителей огнеупоров, и нигде не было ссылок на наличие таких реакторов в фирмах по производству техуглерода / 1.7.3. /.

О применении циркониевых огнеупоров на Омском заводе технического углерода было сообщено специалистами

ОАО «УкрНИИО» им. А.С.Бережного на международной научно-технической конференции «Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности» (26-27 апреля 2005 года) / 1.7.5./ Тезисы доклада даны в приложении 8.5. Внедрение циркониевых огнеупоров позволило увеличить температуру в камерах горения реакторов с 1830-1850⁰С. до 1960-1990⁰С и, как следствие, повысить выход техуглерода из сырья на 3-4% абсолютных, а также увеличить выход техуглерода на сумму сырья и топлива, уменьшить расход газа на 1т. вырабатываемого техуглерода и снизить объём газов, образующихся из 1т. сырья, что позволяет дополнительно увеличить нагрузку реактора по сырью. Увеличение количества сырья, подаваемого в реактор, ведёт к увеличению производительности всей установки по производству техуглерода, а, следовательно, и получению дополнительной прибыли.

Следует отметить, что одновременно с внедрением новых огнеупоров (корундовых, а затем циркониевых) внедрялись новые реакторы заводской конструкции, обеспечивающие увеличение производительности реакторов, а также новые воздухоподогреватели заводской разработки, обеспечившие повышение температуры воздуха, подаваемого в реактор с 500-550⁰С. до 750-820⁰С..

Кроме того, в связи с увеличением выпуска техуглерода возник дефицит сырья, в результате в сырьевые смеси начали вовлекаться низкосортные компоненты, вплоть до мазута.

Поэтому определить повышение выхода непосредственно за счёт применения новых огнеупоров можно было только при проведении балансовых испытаний.

Для проведения сравнительных балансовых испытаний был запущен реактор, футерованный огнеупорными блоками из муллитокорундовой массы КС-90 и оборудованный воздухоподогревателем ВНИИТУ с температурой подогрева воздуха 550°C ., при этом температура в камере горения была выше норм ВНИИТУ на $50-60^{\circ}\text{C}$. и составляла $1590-1600^{\circ}\text{C}$., то-есть это была та температура, которая поддерживалась в реакторах омского ЗТУ перед внедрением корундовых огнеупоров. Для сравнения использовался реактор, футерованный корундовыми блоками с содержанием окиси алюминия 99% и той же температурой подогрева воздуха.

Для определения изменения выхода техуглерода от применения циркониевых огнеупоров сравнивались режимы получения техуглерода N347 в реакторах с циркониевой и корундовой камерами горения при одинаковой температуре подогрева воздуха – 795°C . (реакторы были оборудованы системами подогрева воздуха заводской конструкции,

Основные результаты балансовых испытаний показаны в Табл. 1. (Приложение 8.3.) Из приведённых данных видно, что при прочих равных условиях (расход сырья в реактор; качество сырья; температура подогрева воздуха) в реакторе, футерованном корундовыми огнеупорами, увеличение вы-

хода техуглерода по сравнению с реактором, футерованном блоками из КС–90, составило 6,48% абсолютных за счёт повышения температуры в камере горения реактора с 1590 до 1840⁰С. Увеличение выхода техуглерода из сырья на 6,48% соответствует уменьшению расхода сырья для производства 1т. техуглерода на 11%. Это очень существенная разница, так как сырьё для производства техуглерода не только дорогой, но и дефицитный продукт. Тот факт, что по заводским отчётам общий выход техуглерода повысился с 2001 по 2003 годы несколько ниже (на 4,1%) объясняется тем, что помимо протекторных марок техуглерода завод производил около 30% каркасных марок техуглерода (серий 500 и 600), технология получения которых основана на использовании сравнительно низкотемпературных процессов и где применение корундовых огнеупоров не могло дать таких значительных результатов. Кроме того, качество одного из основных компонентов сырьевой смеси – каталитического газойля в этот период непрерывно ухудшалось, что не могло способствовать повышению выхода техуглерода из сырья.

Определение эффективности применения циркониевых огнеупоров проводилось при получении техуглерода N347 с использованием чистого коксохимического сырья на реакторах с корундовой (99% AL2O3) и циркониевой футеровками при температуре подогрева воздуха 795⁰С. в обоих случаях и температурах в камерах горения реакторов 1850⁰С и 1980⁰С соответственно. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Анализ результатов испытаний показывает, что выход техуглера из сырья при использовании реактора с циркониевой футеровкой увеличился на 4,01% абсолютных и достиг величины 66,7%. Соответственно уменьшился на 6,0% и расход сырья на производство 1т. техуглера, выход техуглера на сумму сырья и топлива увеличился на 3,29%. Расход воздуха в реактор сократился на 7%, а расход воды уменьшился на 16%. Несколько снизился и расход природного газа на производство 1т. техуглера. Объем образующихся газов не измерялся, но исходя из уменьшения расходов воздуха и воды он снизился не менее чем на 10%, что позволяет увеличить производительность реактора и технологического потока примерно на ту же величину.

Необходимо отметить, что по зарубежным данным выход техуглера N347 при применении чистого коксохимического сырья составляет 61-62% абсолютных. Выход техуглера на уровне 66-67% достигается только при получении низкодисперсного техуглера N550 при использовании высокоиндексного коксохимического сырья (ИК=160)/1.7.8./.

В мае 2006 года на ОЗТУ были проведены сравнительные балансовые испытания при получении техуглера серии 300 в реакторах с циркониевой (р-р №342) и корундовой (р-р№312) камерами горения. В связи с недостатком стандартных видов сырья для производства техуглера в сырьевых смесях использовалось 50% мазута, что в зарубежных фирмах не допускается. Выход техуглера из сырья соста-

вил 50,81% в реакторе с камерой из 99% корунда и 54,98% в реакторе с циркониевой камерой горения. Расход сырья для получения 1т. техуглерода составил соответственно 1,9681т. и 1,8188т. Уменьшение расхода сырья для получения одной тонны техуглерода составило: Сравнивая результаты этих балансовых испытаний с результатами испытаний начала 2005 года (табл.1) нетрудно установить, что выход техуглерода в реакторе с циркониевой камерой горения даже при использовании сырья с содержанием 50% мазута (ИК=55) на 3,29% выше, чем при применении стандартной смеси и технологии ВНИИТУ (Табл.1., пункт1.). Уменьшение расхода сырья при этом составило 6,0%. Из этого можно сделать вывод, что в исключительных случаях в реакторах с циркониевой футеровкой можно использовать низкосортные виды сырья. Рентабельность естественно значительно понизится, но это лучше, чем снижение объёмов производства из-за недостатка стандартных видов сырья и возможного срыва поставок техуглерода.

1.3. Эффект от внедрения циркониевых огнеупоров на ОЗТУ.

Как показали результаты балансовых испытаний, применение в камерах горения реакторов циркониевых огнеупоров приводит к увеличению выхода техуглерода из сырья на 4% абсолютных, а также уменьшению расхода сырья на производство 1т. техуглерода от 6,0 до 7,6% в зависимости от

вида применяемого сырья. При этом, чем ниже индекс корреляции сырья, тем больше его экономия при использовании циркониевых огнеупоров. Но это далеко не весь результат от применения циркониевых огнеупоров. Установлено уменьшение расхода воздуха и воды в реактор на 7,0 и 16% соответственно. Исходя из этих данных можно с уверенностью утверждать, что объём реакционных газов уменьшился не менее, чем на 10%, а это позволяет увеличить количество сырья, подаваемого в реактор тоже на 10%. Если использовать этот ресурс, на эту же величину возрастёт и прибыль, получаемая от реализации техуглерода на этом потоке. Естественно, сокращение потребления воздуха и воды тоже дают экономический результат, имеется и экономия электроэнергии. Понятно, что циркониевые огнеупоры имеют высокую стоимость, однако простые расчёты показывают, что срок окупаемости замены футеровки одной камеры горения составляет не более 1,5 месяца при сроке межремонтного пробега реактора 1,0-1,5 года (расчёт прилагается). Расчёт производился только исходя из экономического эффекта от экономии сырья за счёт повышения выхода техуглерода. При этом при дважды подтверждённом при балансовых испытаниях увеличении выхода 4,17 и 4,01% в исходных данных расчёта предусмотрено увеличение выхода только на 3%. Даже при таком заниженном увеличении выхода техуглерода из сырья годовой экономический эффект от применения циркониевых огнеупоров на одном реакторе составляет 11 млн.

руб. Срок окупаемости мероприятия при этом составляет 1,3 месяца. Проведены также расчёты при увеличении выхода на 2,0% и 1,0%. Сроки окупаемости при этом составляют соответственно 2 месяца и 3,3 месяца.

В расчёт намеренно не включалась дополнительная прибыль за счёт увеличения нагрузок реактора по сырью, экономия воздуха и воды, экономия газа и электроэнергии. Дополнительная прибыль от увеличения производительности реактора не включалась в расчёт потому, что она зависит и от субъективных факторов – могут увеличить нагрузку, а могут и не увеличивать. Главное же в том, что экономии сырья вполне достаточно, чтобы показать эффективность мероприятия.

Для полной компенсации затрат на мероприятие для одного потока потребуется $1380000/9000/1,5=102$ т. сырья. Где 1380000руб – стоимость огнеупоров, 9000руб/т.– стоимость 1т сырья, 1,5 года – срок службы футеровки камеры горения. Понятно, что 102т. сырья при годовом потреблении 30000т. составляют от годового его потребления всего 0,3%.

Существенное значение имела и экономия самих огнеупоров, как прямая, так и косвенная. Прямая экономия была организована на участке по изготовлению огнеупоров под руководством Бабича Г.В. за счёт изготовления циркониевых огнеупорных блоков с включением в их состав отработанных циркониевых огнеупоров, так называемого огнеупорного лома. Кстати, это было совершенно новое дело в миро-

вой промышленности техуглерода. Целесообразность и возможность повторного использования отработанных циркониевых огнеупоров была подтверждена исследованиями специалистов ОАО УкрНИИО имени А.С.Бережного, г. Харьков. /1.7.10/. Следует отметить, что огнеупорный лом одинаково успешно используется при изготовлении циркониевых огнеупоров как с использованием в качестве стабилизатора окиси иттрия, так и окиси кальция. Под косвенной экономией подразумевается реконструкция реакторов на высокопроизводительных установках с увеличением их производительности в 1,5 раза без увеличения размеров камер горения. В результате при одинаковых объёмах циркониевых огнеупоров в реакторах производительность реакторов возросла в 1,5 раза, следовательно, в расчёте на тонну произведённого техуглерода количество циркониевых огнеупоров уменьшается в 1,5 раза. Это стало возможным в результате полной реконструкции реакторных отделений установок в 2009—2012 годах. Следует отметить, что в результате этой реконструкции и проведённых ранее усовершенствований, установка не уступает вновь построенным в России установкам по производству техуглерода.

К экономическим результатам внедрения циркониевых огнеупоров нужно отнести и тот факт, что наиболее дисперсные марки техуглерода (например, N121) удавалось получать только в реакторах с циркониевой камерой горения. Если бы не было таких реакторов, то не было бы и возможно-

сти получать такие марки техуглерода, не было бы и соответствующих контрактов со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Заканчивая этот раздел целесообразно отметить, что достигнутый эффект от применения циркониевых огнеупоров может быть значительно увеличен за счёт дальнейшего повышения температуры в камерах горения. Это вполне реально без изменения конструкции реакторов. Можно на одном из реакторов по специальной программе повышать температуру в камере горения по 5-10⁰С. Можно поднять температуру в камере горения перед остановкой реактора на капитальный ремонт. В реакторе могут выявляться слабые места, но это было всегда и недостатки всегда устраняли.

1. 4. Необходимые условия для внедрения новых огнеупоров

Начиная с 2001 года основной эффект в промышленности техуглерода на передовых заводах достигался за счёт использования новых огнеупоров с повышенной температурой применения, что позволило сначала повысить температуру в камерах горения реакторов с 1550⁰С. до 1840⁰С., а затем (правда, только на Омском ЗТУ) и до 1960–1990⁰С. Внедрение новых огнеупоров на заводах техуглерода не такой простой процесс. Это не означает, что достаточно заказать огнеупоры для футеровки реакторов. Во-первых, такие огнеупоры на отечественных заводах не производились. Во-вторых, стандартные огнеупоры не подходили для камер горе-

ния реакторов, ну и последнее – нужно было организовать переоборудование большого количества реакторов в сжатые сроки. Поэтому для быстрого и квалифицированного внедрения новых огнеупоров необходимы следующие условия:

1.4.1 Наличие специалистов как по изготовлению, так по применению огнеупоров.

1.4.2. Наличие собственной базы для изготовления огнеупоров.

Ранее уже говорилось об участках по изготовлению огнеупоров, понятно, что для успешной их эксплуатации требуются квалифицированные кадры. Приоритет Омского ЗТУ во внедрении новых огнеупоров связан и с тем, что ОЗТУ имел на этом направлении наиболее квалифицированных специалистов. Так, Бабич Геннадий Васильевич начиная с 90-х годов, как уже отмечалось ранее, проводил всю работу по изготовлению огнеупоров от проектирования прессформ и до окончания процесса изготовления огнеупоров. Кроме того он принимал непосредственное участие в разработке конструкций реакторов, а также проводил основную работу с поставщиками набивной массы. Имеет завод также в технических отделах и цехах квалифицированных специалистов, хорошо разбирающихся в качестве футеровки и процессе эксплуатации реакторов.

С использованием реакторов с циркониевой футеровкой было получено много новых марок техуглерода. Только в 2011 году было разработано 10 новых марок техуглерода, по-

ловина из них это высокодисперсные и высокоструктурные марки техуглерода, которые производились в болшегрузных реакторах с камерами горения, футерованными циркониевыми огнеупорами. Следует отметить, что ещё при внедрении техуглерода N121, было выяснено, что эта марка стабильно получается только в реакторах с циркониевой футеровкой камеры горения. Это обстоятельство способствовало изменению отношения многих специалистов к внедрению циркониевых огнеупоров.

В этом же году в связи с увеличением потребности в техуглероде завод впервые выпустил более 230 тыс. т. техуглерода, при этом на высокопроизводительных установках проектная мощность была превышена на 16,8%, в цехе №3 на 31,8% при использовании 3-х потоков, тогда, как проектная мощность цеха рассчитывалась на четыре потока. В производстве полуактивных марок техуглерода проектная мощность была превышена на 59,5%. Такого результата удалось достичь за счёт внедрения комплекса мероприятий в течение ряда лет. Мероприятия по повышению производительности технологических потоков осуществлялись постоянно. Однако наибольшее значение для увеличения выпуска техуглерода имело внедрение новых огнеупоров – корундовых, а затем и циркониевых. По сравнению с началом 2002 года выход протекторных марок техуглерода увеличился в 2011 году на 12% что соответствует уменьшению расхода сырья на 19,35%. Таким образом, при выходе техуглерода из сы-

рья, который был достигнут ОЗТУ до внедрения новых огнеупоров, для выпуска 134476,7 т. протекторного техуглерода, произведённого в 2011 году, потребовалось бы дополнительно 52 тыс. т. сырья, которое вряд ли можно было приобрести и, тем более, переработать. Что касается результатов внедрения новых огнеупоров в производстве полуактивных (каркасных) марок техуглерода, то здесь необходимо отметить, что при производстве этих марок техуглерода непрерывно снижалось качество сырья. И, если в 90-е годы в цех подавалось сырьё с индексом корреляции 135-140 ед., то затем он был понижен до 115-117 ед. за счёт использования низкоиндексного газойля Омского нефтезавода. При таком уменьшении индекса корреляции (ИК.) выход техуглерода из сырья по данным/1.7.8./ уменьшается на 5-6 %. Это уменьшение выхода техуглерода и было компенсировано за счёт уменьшения соотношения воздух:газ. Как известно, при уменьшении соотношения воздух:газ повышается температура факелов горелок, что приводит к повышению выхода техуглерода. При футеровке реактора муллитокорундовыми огнеупорами с содержанием окиси алюминия 87-90% это соотношение нельзя было понизить менее 14:1, так как повышалась температура в зоне реакции более 1600⁰С., что могло неблагоприятно отразиться на футеровке реактора. При использовании корундовой футеровки это соотношение удалось понизить почти до стехиометрического, при этом температура в зоне реакции после кратковременного повышения пони-

жалась до норм регламента.

Понятно, что применение циркониевых огнеупоров даёт существенное повышение выхода техуглерода из сырья (4,01 и 4,17% по результатам балансовых испытаний), но эксплуатация такого реактора сложнее и требует дополнительного обучения обслуживающего персонала. В связи с применением в реакторе разнородных огнеупорных материалов более высокие требования предъявляются и к самой футеровке реактора. Это обусловлено тем, что окись циркония в смеси с окисью алюминия образуют смеси, имеющие при определённом соотношении температуру плавления даже ниже, чем чистая окись алюминия (письмо ОАО «УКРНИО» им А.С. Бережного, направленное 03.10.03. в адрес технической службы Омского ЗТУ). К письму была приложена диаграмма состояния системы $ZrO_2-Al_2O_3$, из которой следует, что минимальная температура плавления (эфтектика) образуется при содержании в системе 61,7 процентов молярных Al_2O_3 и составляет $1710^{\circ}C$., притом, что температура плавления окиси алюминия составляет $2050^{\circ}C$, а окиси циркония – $2715^{\circ}C$. (Приложение 8.2.). Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке конструкции футеровки реактора с циркониевой камерой горения. Так, в случае разрушения циркониевого блока футеровки реактора (как правило, в его торцевой части) в камеру горения попадают части разрушенного корундового блока, что сразу же приводит к оплавлению нижней части камеры горения. Эти недостат-

ки конструкции футеровки реактора были устранены и подобные случаи не повторялись. Другим опасным местом в футеровке реактора является примыкание корундового блока к циркониевому в переходной втулке реактора. Как показала практика эксплуатации реакторов, в данном случае низкоплавкая смесь создаётся только при нарушении технологического режима, когда начинает плавиться корундовый блок при превышении температуры более 1900°C . в переходной втулке реактора в зоне за сырьевыми форсунками. Это может происходить при неправильных действиях персонала при пусках и остановках реакторов, а также при замене сырьевых форсунок. Вероятность оплавления огнеупоров значительно снижается, если в зоне контакта разнородных блоков вместо корундового блока установить блок из хромистого корунда с содержанием окиси хрома $\geq 12\%$ масс. Как уже отмечалось ранее, по заказу ОЗТУ такой материал изготавливает Верхнепышменский огнеупорный завод, применение его в этой зоне значительно снижает количество оплавов. Огнеупорность такого материала по данным УКРНИИО составляет 2125°C ., тогда как огнеупорность корунда Богдановичского огнеупорного завода составляет 2030°C . Это существенная разница, и это особенно важно в связи с необходимостью повышения температуры в зонах горения реакторов. Возможно использование в этой зоне и блоков, изготовленных из шпинели ($\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), содержащей 28,33% мас. MgO и 71,67% мас. Al_2O_3 , и имеющей температуру плавления

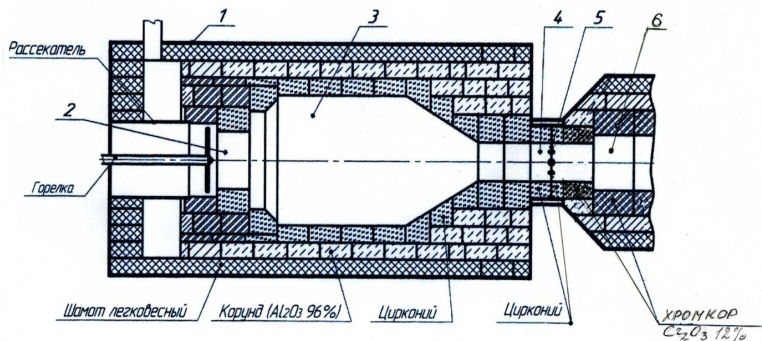
ния 2135°C . /1.7.6./ Такой состав производится и в России (Востокогнеупор, Екатеринбург, Масса шпинельная набивная—МШПН).

1. 5. Эксплуатация циркониевых реакторов.

Как уже отмечалось, обслуживание реакторов с циркониевой камерой горения сложнее и требует более высокой квалификации обслуживающего персонала. Поэтому нужно рассмотреть необходимые условия правильной эксплуатации таких реакторов. На Рис/1/ показан эскиз реактора с циркониевой камерой горения, включающий: 1—корпус реактора, 2—камера смешения топлива с воздухом, 3— камера горения, 4—смесительное сопло, 5—плоскость ввода сырья в смесительное сопло, 6—начальная часть зоны реакции. На нём указаны и основные огнеупорные материалы футеровки камеры горения/3/, смесительного сопла/4/ и начальной зоны камеры реакции реактора /6/. Как показано на эскизе огневой слой камеры горения /3/ и основная часть смесительного сопла /4/ футерованы циркониевыми блоками. Последний блок смесительного сопла и блоки начальной части зоны реакции изготовлены из хромистого корунда содержащего 12% Cr_2O_3 . Огнеупорность этого материала, как уже было указано, достигает 2125°C . Этот материал можно заменить шпинелью с содержанием 28,5% мас. MgO и 71,5% мас. Al_2O_3 . Целесообразно также испытать в этой зоне хромистый корунд с содержанием окиси хрома 20—25%. Остальная часть зоны реакции футерована корундовыми огнеупо-

рами с содержанием окиси алюминия $\geq 99\%$.

Реактор для получения технического углерода (русс.)



Применение циркониевых огнеупоров только в зоне горения и смесительном сопле обусловлено двумя факторами. Во-первых, температура в зоне реакции не превышает $1870-1880^{\circ}C$. даже в аварийных ситуациях и применение дорогостоящих циркониевых огнеупоров не вызвано необходимостью. Во-вторых, и это главное, циркониевые огнеупоры разрушаются в восстановительной газовой среде, что и имеет место в зонах реакции реакторов в связи с наличием в газах зоны реакции окиси углерода, водорода, сероводорода. Осо-

бенно быстро разрушаются циркониевые блоки при попадании на них капель или паров сырья.

Как уже указывалось, температура в камерах горения реакторов, футерованных циркониевыми огнеупорами, достигает фактически 1990°C ., поэтому при прекращении подачи сырья в зоне реакции реактора может превысить допустимую температуру для корундовых огнеупоров (1880°C .), что приведёт к их оплавлению. С учётом этого фактора, при переводе реактора на режим полного горения необходимо предварительно понизить температуру в камере горения реактора до 1600°C ., уменьшив не только расход газа, но и расход воздуха. Следует отметить, что такую же операцию нужно проводить и при переводе на режим полного горения реакторов с камерами горения из корундовых огнеупоров. Если этого не делать, то при температуре в зоне горения реактора $1840\text{--}1870^{\circ}\text{C}$. во время перекрытия сырья температура в зоне реакции неизбежно повысится в течении какого-то времени выше 1900°C ., так как сырьё не перекрывается мгновенно, более того это может быть значительный период времени (до полного перекрытия запорной арматуры на сырьевые форсунки). Поэтому перед остановкой реактора необходимо понизить температуру не только в камере горения, но и в зоне реакции реактора уменьшением расхода воздуха. Понижать температуру в камере горения и в зоне реакции реактора необходимо и перед заменой сырьевой форсунки. Если же температуру в зоне реакции перед заменой сырьевой фор-

сунки оставить без изменений, то при перекрытии сырья на одну из форсунок температура в зоне реакции резко увеличится и может превысить допустимую температуру для огнеупора. Это объясняется тем, что температура в зоне реакции зависит от соотношения воздух : сырьё и, если сократить количество сырья, подаваемого в реактор, без уменьшения количества подаваемого воздуха (например, при замене одной форсунки), то температура в зоне реакции резко повысится и будет превышать допустимую температуру для огнеупора. Правильный перевод реактора на режим полного горения, соблюдение инструкции по замене сырьевых форсунок исключают возможность оплавления футеровки реактора, однако каждое значительное изменение температурного режима сокращает срок службы огнеупора. Поэтому очень важно сократить количество переводов реакторов на режим полного горения, особенно в связи с заменой сырьевых форсунок. Для этого нужно исключить причины забивания сырьевых форсунок

Забивание сырьевых форсунок связано в основном с тремя факторами:

1.Наличием механических примесей в сырье, в том числе сырого антрацена при низких температурах сырья.

2.Подачей большого количества присадки для снижения абсорбции дибутилфталата техуглерода при неравномерном распределении её в сырьевой смеси.

3.Выдвижением корпуса сырьевой форсунки непосред-

ственно в высокотемпературный поток продуктов полного горения природного газа.

Очистка сырья от механических примесей должна производиться как до печей подогрева сырья, так и после них. Необходимость дополнительной очистки сырья после печей подогрева связана с тем, что в процессе подогрева сырья могут образовываться коксовые частицы. Несмотря на двухступенчатую очистку сырьевых смесей на сырьевом участке, не исключена возможность попадания механических примесей в трубопроводы сырья технологических цехов в результате порыва сеток фильтров сырьевого участка. Поэтому в технологических цехах установлены собственные фильтры с более мелкими ячейками сеток для очистки сырья перед подачей его в реакторы. Необходимо отметить, что только за счёт применения сетчатых фильтров полностью исключить забивание сырьевых форсунок не удаётся, так как на плохо изолированных стенках сырьевых трубопроводов, корпусах клапанов и задвижек могут отлагаться частицы сырого антрацена, которые затем периодически срываются потоком сырья и забивают форсунки. Поэтому сырьевые трубопроводы должны хорошо изолироваться и температура сырья в цеховых трубопроводах должна поддерживаться не ниже 250°C . Но главным условием предотвращения забивания сырьевых форсунок механическими примесями является надлежащий надзор за фильтрами очистки сырья. Нельзя допускать порыва сеток, что приводит к концентрированному вы-

бросу механических примесей в сырьевые трубопроводы. На каждом фильтре должен измеряться перепад давления, который позволяет определить состояние сетки фильтра. Необходимо также соблюдать график замены сеток фильтров.

Подача водного раствора присадки (KCL или KOH) в сырьевой трубопровод приводит к тому, что из водного раствора в форсунках постепенно происходит отложение сухого остатка присадки, что и приводит к забиванию сырьевых форсунок. На степень забивания сырьевых форсунок оказывает влияние концентрация присадки в сырьевой смеси (мг. присадки на кг. сырья). Как известно, на снижение показателя адсорбция дибутилфталата техуглерода оказывают влияние ионы щелочных металлов, образующиеся в пламени. Поэтому для достижения одного и того же эффекта гидроксида калия (KOH) требуется на одну треть меньше, чем хлористого калия (KCL). Это объясняется тем, что в молекуле KOH содержание калия составляет 69,6%, тогда как в молекуле KCL только 52,5%. Таким образом, при применении KOH концентрация присадки в сырьевой смеси будет на 30% меньше, чем при использовании хлористого калия, что соответственно отразится и на степени забивания сырьевых форсунок. Кроме того, KOH частично взаимодействует с сырьём (с фенолами, содержащимися в коксохимическом сырьё), что дополнительно снижает вероятность образования сухого остатка KOH в форсунках. Хлористый калий является нейтральной солью и с сырьём не взаимодействует. Опре-

делённое влияние на образование сухого остатка присадки в форсунках оказывает и концентрация присадки в водном растворе. Так, если необходимое количество присадки подавать дозирующим насосом с расходом 10 л/час, что ранее рекомендовали проектировщики, то концентрация присадки в водном растворе будет в 10 раз выше, чем при использовании насоса с расходом 100л/час (НД100). Естественно, что и вероятность образования сухого остатка в первом случае будет значительно выше. Это особенно нужно учитывать при выпуске низкоструктурных марок техуглерода, когда требуется подавать в сырьё большое количество присадки. Необходимо также принимать меры по обеспечению равномерного распределения присадки в сырьевом трубопроводе, для чего требуется устанавливать смеситель (например, диафрагменный).

Коксование и обгорание сырьевых форсунок происходит при выдвигании распылителей сырьевых форсунок непосредственно в высокотемпературный поток полного сгорания газов. Это может происходить как в результате неправильного определения длины форсунки, так в результате поверхностного износа (эрозии) смесительного сопла реактора. В этом случае длина форсунок такого реактора должна подбираться с учётом величины износа.

Узел ввода с сырьевой форсункой

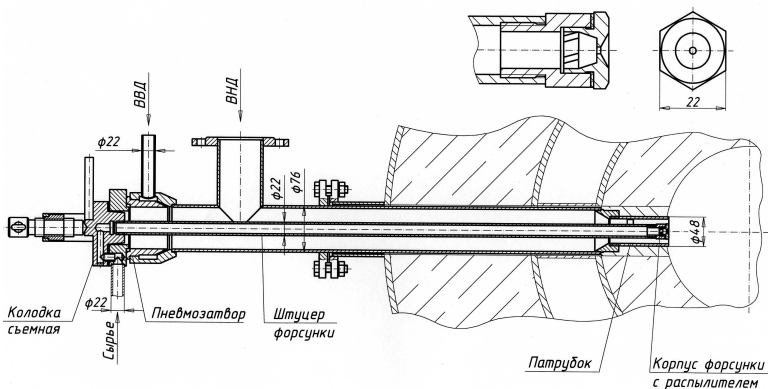


Рис. 2

На рис.2 показан узел ввода сырья в реактор с сырьевой форсункой. Важным элементом узла ввода является его патрубок диаметром 48мм, смонтированный заподлицо (вровень) со смесительным соплом реактора. Корпус сырьевой форсунки должен располагаться вровень с патрубком узла ввода, как это показано на рис.2. Патрубки узлов ввода диаметром 48мм. (применяются и патрубки $D=42$ мм.) изготавливаются из жаропрочной стали 15X25Т, выдерживающую температуру до 1000°C . Корпус и распылитель сырьевой форсунки также должны изготавливаться из жаропрочной стали, однако обычно они изготавливаются из стали 12X18Н10Т, которая выдерживает температуру только до

750⁰С., что, естественно, сокращает срок службы форсунки. Продолжительность работы форсунок без замены зависит и от расхода сырья в реактор. Чем больше сырья поступает в форсунку, тем меньше вероятность забивания и закоксовывания распылителя и выходного отверстия форсунки.

Большое значение для обеспечения необходимого срока службы футеровки камеры горения реактора имеет состояние газовой горелки. Особенно это важно при применении дорогостоящих циркониевых огнеупоров.

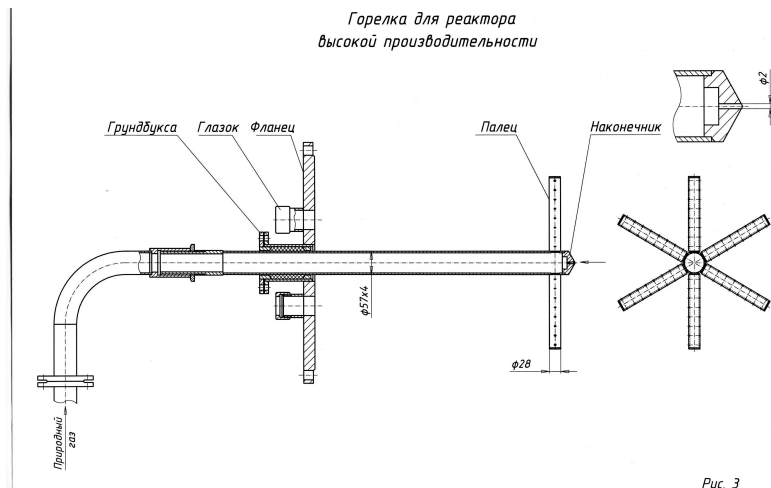


Рис. 3

Общий вид горелки для реакторов высокой производительности (4500—5000кг/час) показан на рис.3. Природный газ по трубе диаметром 57мм. поступает к пальцам горелки

и через отверстия в них распределяется равномерно по сечению горелочного туннеля камеры горения, где интенсивно перемешивается с горячим воздухом и сгорает. Пальцы в количестве шести штук расположены равномерно по окружности и представляют собой заглушенные с торца трубы диаметром 28мм. с отверстиями. В каждом пальце имеется по 8 сквозных отверстий различного диаметра (от 2,0 до 4,2мм.) Важное значение имеет наконечник, назначение которого заключается в предотвращении обгорания торца газовой трубы. Горелки должны изготавливаться из жаропрочной стали марки 15X25Т, которая может выдерживать температуру до 1100⁰С. Однако, на заводах, применяющих эти горелки они, как правило, изготавливаются из стали 12X18Н10Т с температурой применения до 800⁰С., что значительно снижает их надёжность, увеличивая вероятность прогара горелок как в процессе их эксплуатации, так и при остановке реакторов. После каждой остановки реактора горелку необходимо заменить, так как после прекращения подачи газа и воздуха горелка подвергается воздействию высокотемпературной воздушной среды камеры горения, что обычно приводит к прогару металла элементов горелки. Как показывает практика, к особо опасным последствиям приводит прогар конуса горелки. В этом случае основная часть газа поступает в горелочный туннель непосредственно по трубе, полноценного смешения газа и воздуха не происходит и горение смещается в коническую часть камеры горения реактора, что может

привести к растрескиванию циркониевых огнеупоров и сокращению срока их службы. Возможно в отдельных случаях смещение фронта горения в смесительное сопло реактора, что наиболее опасно, так как это может привести к оплавлению огнеупоров, находящихся непосредственно за циркониевыми блоками. Обычно в таких случаях при неизменных расходах газа и воздуха температура в камере горения понижается на 30-80⁰С. При наличии таких изменений необходимо остановить реактор и заменить горелку. При прогаре горелки площадь её проходного сечения увеличивается и при одном и том же расходе газа давление газа перед горелкой снижается. Величина падения давления зависит от степени прогара металла горелки, Но определить её можно всегда, сравнивая аналогичные режимы работы реактора в данное время и предыдущие периоды. Удостоверившись в понижении давления газа перед горелкой при неизменном расходе газа необходимо заменить горелку. Повышение давления газа перед горелкой при постоянном расходе газа указывает на то, что часть отверстий пальцев забита. Это может привести к прогару металла отдельных пальцев горелки. При повышении давления газа перед горелкой выше регламентной нормы горелку тоже нужно заменить. Следует отметить, что эта горелка используется в отрасли длительное время. Конструкция горелки разработана ещё ВНИТУ. Недостатки этой горелки указаны выше. На некоторых заводах, например, Ярославском и частично Омском используются и дру-

гие конструкции горелок, но они не обеспечивают хорошего смешения газа и воздуха. Для разработки более совершенной горелки необходимо сотрудничество со специализированными организациями, занимающимися процессами сжигания топлива. Что касается действующей горелки, то, как уже отмечалось, для её изготовления необходимо использовать жаропрочную сталь, например, марки 15X25T. Большое значение имеет и качество сварки наконечника с корпусом горелки.

Важнейшее значение при эксплуатации реакторов имеет контроль за состоянием стёкол и каналов пирометров. При загрязнении стекла или частичном перекрытии пирометра, измеряющего температуру в зоне горения реактора, пирометр будет фиксировать температуру ниже действительной температуры в камере горения. В этом случае нужно срочно почистить стекло или канал пирометра. Недопустимо в подобных случаях производить подъём температуры на прежний уровень увеличением расхода природного газа, так как фактические технологические параметры не будут соответствовать заданным, а в случае, если камера горения футерована корундовыми огнеупорами, это приведёт к их оплавлению. При частичном перекрытии канала или загрязнении стекла пирометра, измеряющего температуру в зоне реакции реактора, показания температуры будут также искажены в сторону уменьшения, то есть фактическая температура в зоне реакции реактора будет значительно выше той, кото-

рую показывает пирометр. В этом случае необходимо остановить реактор и прочистить канал и стекло пирометра. В противном случае эксплуатация реактора будет осуществляться фактически без контроля температуры в зоне реакции, что может привести к выпуску бракованного техуглерода или оплавлению футеровки зоны реакции реактора.

Таким образом, в этом разделе приведены основные факторы, влияющие на процесс эксплуатации огнеупоров реакторов для получения техуглерода.

6. Заключение.

1.6.1. Качество огнеупоров всегда оказывало значительное влияние на состояние и эффективность процессов получения техуглерода. С увеличением температуры применения огнеупоров возникает возможность повышения температуры как в камере горения, так и в зоне реакции реактора, что обеспечивает увеличение выхода техуглерода из сырья и даёт возможность получать новые, более дисперсные марки техуглерода.

1.6.2. За счёт применения новых огнеупоров, начиная с 2001-го года, передовые отечественные заводы техуглерода значительно сократили потребление сырья для производства протекторных марок техуглерода. Максимальный выход техуглерода из сырья был достигнут на Омском ЗТУ за счёт футеровки камер горения реакторов циркониевыми огнеупорами. Следует отметить, что качество сырья при этом было су-

щественно ниже, чем в базовом периоде. Приходилось даже использовать сырьевые смеси с содержанием 50% мазута. Результаты сравнительных испытаний такого сырья при использовании реакторов с циркониевой и корундовой камерами горения приведены в разделе 2. Значительно ухудшилось и качество каталитического газойля за счёт добавления в газойль для получения техуглерода с установки 43-107 низкоиндексного газойля с установки 43-103. В результате индекс корреляции каталитического газойля понизился со 125-127ед. до 115-117ед. В этих условиях особенно большое значение имеет использование для футеровки камер горения реакторов циркониевых огнеупоров, обладающих наивысшей огнеупорностью. Как показали балансовые испытания, проведённые в 2005 году, при использовании коксохимического сырья выход техуглерода N347 в реакторе с циркониевой камерой горения составил 66,7%, при этом использование углерода, содержащегося в сырье, составило 73,3%. Такого результата в то время не имели даже лучшие зарубежные фирмы. Если сравнивать этот результат с выходом подобного техуглерода из сырья в базовом периоде, то есть до внедрения заводом корундовых огнеупоров, то выход техуглерода увеличился в среднем на 17-18%, а экономия сырья составила 26,5-27,5%. При этом, не нужно забывать, что экономический результат от внедрения новых огнеупоров не ограничивается только экономией сырья, о чём подробно описано в разделах 2. и 3.

1.6.3. В производстве каркасных марок техуглерода серий 500 и 600 использование циркониевых огнеупоров пока невозможно, так как камера горения не отделена полностью от зоны реакции в связи с аксиальной подачей сырья. Однако и применение корундовых огнеупоров с содержанием окиси алюминия 96-99% позволило на ОЗТУ достичь значительных результатов. Удалось увеличить количество природного газа, подаваемого в реактор, без риска возможности разрушения футеровки камеры горения, и довести соотношение воздух : газ до уровня близкого к стехиометрическому. В итоге при значительном снижении индекса корреляции применяемого сырья по сравнению с базовым периодом (90-е годы) от 140ед до 115-117ед, удалось сохранить выход техуглерода из сырья на прежнем уровне и даже его увеличить. Это примерно равнозначно повышению выхода техуглерода на 4-4,5% при одинаковых характеристиках сырья. Дальнейшее повышение выхода техуглерода каркасных марок возможно при разделении зон горения и реакции реакторов и использовании в камерах горения реакторов циркониевых огнеупоров. Целесообразно снова проверить радиальную подачу сырья, так как при температурах в камере горения 1840-1850 этот режим не испытывался.

1.6.4. В период с 2002 по 2012 год внедрение новых огнеупоров оказало большое влияние на снижение себестоимости техуглерода за счёт сокращения потребления сырья, воздуха, воды, электроэнергии на производство техуг-

лерода. Кроме того, за счёт снижения объёмов образующихся газов реакции появилась возможность увеличения производительности установок по производству техуглерода на 10-12%. Всё это оказало значительное влияние на экономические показатели и прибыль заводов техуглерода. Но главный эффект от применения новых огнеупоров – значительное сокращение расхода сырья для выпуска 1т. техуглерода. Так как для производства техуглерода имеется хронический недостаток сырья, экономия его является одним из решающих факторов для увеличения производства техуглерода. При дефиците сырья растёт и его цена и уменьшается прибыль предприятий. Возможности для экономии сырья и повышения эффективности производства за счёт применения новых огнеупоров далеко не исчерпаны. Необходимо увеличить температуру в камерах горения циркониевых реакторов до 2080-2150⁰С. Следует только добавить, что понижение температуры газов полного горения в среднем на 40⁰С. приводит к понижению выхода техуглерода на 1,0-1,2%. Внедрение циркониевых огнеупоров на заводах, производящих протекторные марки техуглерода, и повышение температуры в камерах горения реакторов ОЗТУ до 2080-2150⁰С. позволит увеличить выход техуглерода не менее чем на 3,0-3,5%, что соответствует уменьшению расхода сырья на 4,6-5,5%. Такой величиной обычно и определяется дефицит сырья.

Таким образом, дальнейшее повышение эффективности производства, связанного с применением новых огнеупоров,

заключается в расширении использования циркониевых огнеупоров и повышении температуры в камерах горения действующих реакторов.

Необходимо отметить, что зарубежные заводы техуглерода начали широко использовать циркониевые огнеупоры. Это подтверждают и специалисты отечественных заводов, посетившие в последнее время заводы зарубежных фирм.

1.7. Использованная литература.

1.7.1. Ивановский В.И. Технический углерод. Процессы и Аппараты. Омск. 2004г.

1.7.2. Devid Stiles. Огнеупоры для высокотемпературных зон реакторов для производства технического углерода. Carbon Black World—2000.

1.7.3. Saint —Gobain Energy Systems: Carbon Black refractories. 15/04/2011.

1.7.4. В.Ю. Орлов. А.М. Комаров. Л.А. Ляпина. Производство и использование технического углерода для резин. Ярославль 2002.

1.7.5. Международная научно-техническая конференция «Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности». Тезисы докладов. Харьков 2005. В.В.Ивановский, Г.В.Бабич (ОАО «Техуглерод», г. Омск), В.В.Примаченко, В.В.Мартыненко, И.Г.Шулик, Т.Г.Гальченко (ОАО «УкрНИИО им.А.С.Бережного», г. Харьков)

Применение циркониевых огнеупоров в футеровках

реакторов производства технического углерода.

1.7.6.Справочник Огнеупорные Материалы Москва Ин-термет Инжиниринг 2010.

1.7.7.В.С.Стариков, М.В.Темлянцев, В.В.Стариков, ОГ-НЕУПОРЫ И ФУТЕРОВКИ В КОВШОВОЙ МЕТАЛЛУР-ГИИ. МИСИС, 2003.

1.7.8.Probst Nikolas. Техуглерод: процессы и продукция. Доклад на конференции Carbon Black World-99.

1.7.9.Ю.Е. Пивинский Неформованные огнеупоры. Кн. 1. Теплоэнергетик, 2003.

1.7.10. Исследование набивной массы из диоксида цирко-ния, стабилизированного оксидом иттрия, после эксплуата-ции в реакторе для производства техуглерода.

Авторы: В.В.Примаченко; В.В.Мартыненко; И.Г.Шулик; Е.Б.Протсак; Н.Г.Привалова. Украинский научно–исследо-вательский институт огнеупоров имени А.С. Бережного (Харьков Украина)

В.И.Ивановский; Г.В.Бабич. Омский завод технического углерода (Омск Р.Ф.) 2012.

8.Приложения.

8.1. Расчёт экономического эффекта от внедрения цирко-ниевых огнеупоров в реакторах для производства техуглеро-да серий 300.

1.Исходные данные.

1.1.Минимальный годовой объём выпуска техуглерода на

одном технологическом потоке—17000 т.

1.2. Температура газов в камере горения реактора:

—до внедрения 1840°C., после внедрения 1980°C.

1.3.Выход техуглерода из сырья:

— до внедрения 60%, после внедрения 63%.

1.4. Минимальный срок службы футеровки камеры горения реактора—1год.

1.5. Стоимость одной тонны циркониевой массы—569,701тыс. руб.

1.6. Количество циркониевой массы и мертеля для футеровки одного реактора

– 3,710т.

1.7. Средняя стоимость сырья—9200 руб./т.

2. Расчёт.

2.1. Экономия сырья в результате повышения выхода техуглерода составит:

$17000/0,6-17000/0,63=1349$ т., или в денежном выражении 12410,08 тыс. руб.

2.2. Затраты на футеровку камеры горения реактора составят:

$3,710 \times 569,701 = 2113$ тыс. руб.

2.3. Срок окупаемости затрат на реконструкцию футеровки одного реактора:

$2113 \text{тыс.руб.} / 12410,8 \text{тыс.руб.} = 0,17$ года или $0,17 \times 12 = 2,04$ месяца.

2.4.Годовой экономический эффект от применения цир-

кониевых огнеупоров

На одном реакторе составит: $12410,8 - 2113 = 10300$ тыс. руб. (10,3 млн. руб.).

При использовании вторичного сырья—огнеупорного лома, что постоянно применяется

на Омском ЗТУ, стоимость циркониевой футеровки составит:

$(3,710 - 1,4) \times 569,701 + (1,4 \times 1,140) = 1317,6$ тыс. руб., где 1,4 т.—количество тонн вторичных огнеупоров, 1140 руб за тонну их стоимость.

В этом случае годовой экономический эффект составит: $12410,8 - 1317,6 = 11093$ тыс. руб., срок окупаемости составит: $1317,6 / 12410,8 = 0,106$ года или 1,27 месяца.

Примечание: В расчёте учтён только экономический эффект от экономии сырья при сроке службы футеровки камеры горения реактора 1 год.

05.02.2012. В.И. Ивановский.

8.2. Диаграмма состояния системы $Al_2O_3 - ZrO_2$.

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$

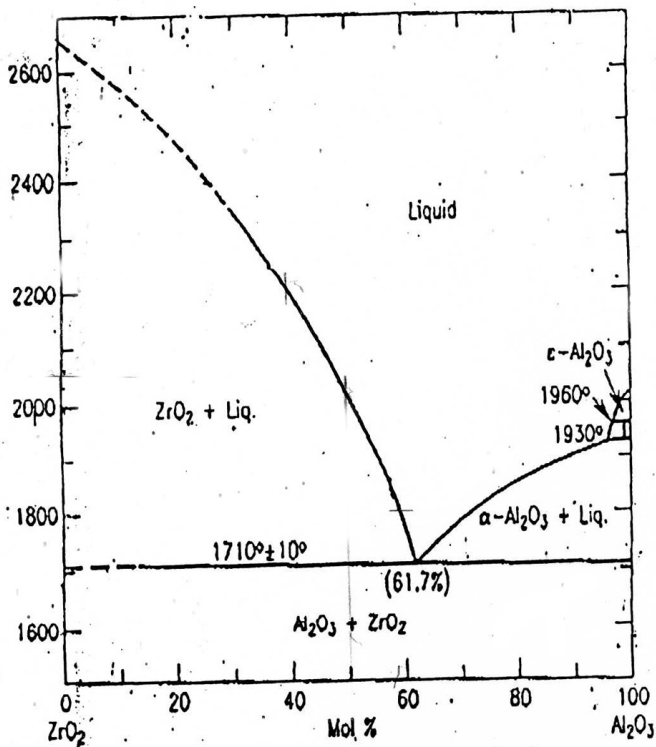


Fig. Zr-083--System $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, showing a new phase, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{:ZrO}_2$, 99:1 wt%).

G. Covalcs, *Der. Dtsch. Keram. Ges.*, 45 [5] 216-219 (1968).

Starting materials were reagent-grade ZrO_2 and Al_2O_3 (purity

8.3. Основные результаты балансовых испытаний. Табл. 1.

2. Совершенствование рекуперативного нагрева технологических агентов.

В литературе [2.7.1.] достаточно подробно рассмотрено использование тепла газов, выходящих из реактора, для нагрева технологических агентов, используемых в процессе получения технического углерода – (воздуха низкого и высокого давления, подаваемого в реакторы, сырья, природного газа, воздуха, используемого в сушильных камерах для сжигания природного газа и отходящего газа производства). Там же показаны и конструкции рекуператоров, используемых для этих целей.

Однако, эти сведения даны по состоянию промышленности техуглерода на начало 2004 года. С тех пор прошло достаточно много времени, поэтому необходимо рассмотреть те изменения, которые произошли в этой области техники.

2.1. Экономические обоснования целесообразности повышения температуры воздуха, подаваемого в реакторы.

Как известно, температура подогрева воздуха, подаваемого в реактор, является вторым по значимости фактором повышения эффективности процесса получения техуглерода. При подогреве воздуха используется физическое тепло углеводородогазовой смеси, выходящей из реактора. При увеличении температуры воздуха снижается количество газа, подаваемого в реактор, уменьшается расход воды для охлаждения угле-

родогазовой смеси, появляется возможность увеличения нагрузки реактора по сырью /2.7.1./, /2.7.3./. Увеличение нагрева воздуха с 500°С. до 800°С. обеспечивает экономию природного газа, используемого в реакторах, на 20%. (в источнике/2.7.1./ показан заниженный результат—14%). Кроме того это позволяет повысить нагрузку реактора по сырью до 40%. В связи с низкой стоимостью природного газа на период проведения работ по повышению температуры воздуха, подаваемого в реакторы (725 руб. за 1000нм³), основной эффект планировалось получить за счёт увеличения расходов сырья в реакторы. Целесообразность проведения работ по повышению температуры подогрева воздуха определялась стоимостью и эффективностью воздухоподогревателей, предназначенных для нагрева воздуха до 750–800°С.

Прежде всего, нужно рассмотреть эффективность рекуператоров, используемых для подогрева воздуха, подаваемого в реакторы. Это обусловлено тем, что эти воздухоподогреватели имеют высокую стоимость, так как изготавливаются из дорогой жаропрочной стали. Однако стоимость и эффективность воздухоподогревателя в значительной степени зависит от его конструкции. Понятно, что российские заводы техуглерода не могли использовать воздухоподогреватели фирмы Alstom, применяемые на заводах крупных зарубежных фирм по производству техуглерода для высокотемпературного нагрева воздуха, подаваемого в реакторы, в связи с их высокой стоимостью и металлоёмкостью. Применение такого по-

догревателя было бы просто убыточно/2.7.1/,стр.77. Не меняло дела и изготовление подобных воздухоподогревателей на заводах России, так как это заняло бы много времени на разработку, изготовление, и освоение таких аппаратов, причём результат мог быть и отрицательным.

Поэтому за основу конструкции высокотемпературного воздухоподогревателя был принят разработанный специалистами ВНИИТУ и применяемый на Омском заводе технического углерода воздухоподогреватель ПВ–185 (авторы – Кореньяк Н.К., Бабич Г.В., Волошин Г.А., Антоненко В.Ф. и др.). Схема и описание работы этого воздухоподогревателя показаны на стр.75 источника/2.7.1./, а также на стр.221, 222 источника/2.7.2./.

ПВ–185 был надёжен в эксплуатации и обеспечивал подогрев воздуха, подаваемого в реактор, до 470-500°С. при нагрузке реактора по сырью до 3500кг/час. Такой подогреватель называют подогревателем уголкового типа, так как трубный пучёк выполнен в форме прямого угла, поэтому каждая труба может свободно удлиняться. Это позволяет изготавливать подогреватели подобного типа ремонтными службами заводов техуглерода, так как не требуется устанавливать компенсаторы на каждую трубу. Разработанные специалистами Омского ЗТУ высокотемпературные воздухоподогреватели ВПВ–235 и ВПВ–250 имели принципиальные отличия от ПВ–185. Большое значение имело устранение перетока холодного воздуха через диафрагму в зону нагретого воздуха, что существенно понижало конеч-

ную температуру воздуха в подогревателе ПВ–185 и было основным конструктивным недостатком этого подогревателя. Влияние этого конструктивного недостатка на конечную температуру нагрева воздуха показано на стр.79 источника/2.7.1/. Для обеспечения высокотемпературного нагрева воздуха и более полного использования тепла углеродогазовой смеси, выходящей из реакторов, воздухоподогреватели ВПВ–235 и ВПВ–250 изготавливаются из жаропрочной стали 10X23H18, выдерживающей температуру до 1100°C., тогда как ПВ–185 изготавливался из коррозионностойкой стали 12X18H10T, температура применения которой не превышает 750°C. Была увеличена и поверхность теплообмена новых воздухоподогревателей до 250м², так как предусматривалось значительное увеличение производительности реакторов. Существенным недостатком подогревателя ПВ185 является также периодическое забивание труб техуглеродом, особенно это проявляется при получении низкодисперсных и низкоструктурных марок техуглерода/2.7.1/. Отложения техуглерода на внутренней поверхности труб воздухоподогревателей ПВ185 значительно увеличились после проведения мероприятий по повышению выхода техуглерода из сырья, так как возросла концентрация техуглерода в реакционных газах, поступающих в воздухоподогреватели. Частично отложения техуглерода в высокотемпературных воздухоподогревателях удалось уменьшить за счёт повышения температуры углеродогазовой смеси на входе в подогрева-

тель ВПВ–235(ВПВ–250) по сравнению с подогревателем ПВ–185 с 750–800°С. до 950°С., при этом, естественно, увеличилась и температура стенок труб, от которой зависит количество отложений техуглерода на стенках труб воздухоподогревателей./2.7.3./; /2.7.1./.

Для дальнейшего повышения температуры стенок труб ВПВ–235(ВПВ–250) был осуществлён предварительный подогрев воздуха до температуры 250–300°С. в обычных трубчатых рекуператорах из стали 12Х18Н10Т. Это позволило не только снизить количество отложений на стенках высокотемпературных воздухоподогревателей, но и обеспечить конечную температуру нагрева воздуха до 750–820°С., что соответствовало уровню подогрева воздуха на заводах техуглерода ведущих зарубежных фирм. Изготовление высокотемпературных воздухоподогревателей и подогревателей предварительного подогрева воздуха производилось ремонтными службами Омского завода технического углерода. Суммарная сметная стоимость обоих подогревателей составляла 5.46млн.руб. Экономический эффект рассчитывался из условий нагрева воздуха до 700°С. и увеличения производительности реактора на 17%. Расчётный срок окупаемости мероприятия по подогреву воздуха, подаваемого в реактор, при этих условиях составлял 17,1 месяца. Фактически срок окупаемости составил менее года, так как температура воздуха составила 780–820°С., а нагрузки по сырью на реактор были увеличены на 23–25%. Эффективность мероприятия подтверждается и экономией природ-

ного газа по заводу. Если экономия природного газа, используемого технологическими цехами Омского ЗТУ, составила в 2003 году 13194тыс.нм³ на сумму 9,57млн. руб., то в 2004 году эта экономия составила уже 13,1млн.руб.

Необходимо отметить, что технологические потоки по производству протекторного техуглерода ОЗТУ до конца 2004года были в основном оборудованы высокотемпературными системами подогрева воздуха, тогда как остальные российские заводы техуглерода в это время не имели таких подогревателей. Ярославский ЗТУ начал заниматься этой темой после посещения Омского завода в середине 2004-го года во время юбилея завода. На остальных заводах техуглерода до сих пор внедрение высокотемпературного подогрева воздуха полностью не проведено. Поэтому необходимо рассмотреть экономический результат от внедрения высокотемпературных воздухоподогревателей различной конструкции в современных условиях.

2.1.1. Применение воздухоподогревателя фирмы ALSTOM(SCHACK®).

На лучших заводах ведущих зарубежных фирм по производству техуглерода для высокотемпературного нагрева воздуха, используются воздухоподогреватели фирмы ALSTOM, обеспечивающие нагрев воздуха до 650, 800 и 900°С. При получении полуактивных (каркасных) марок техуглерода подогрев воздуха производится до 650°С., при получении протекторных марок техуглерода используются воздухоподогре-

ватели, обеспечивающие нагрев воздуха до 800°С. Такой подогреватель имеет сложную конструкцию, о чём будет сказано далее. Масса его составляет 44,5т. (для сравнения масса Омского воздухоподогревателя ВПВ–235 составляет 10,5т.). Стоимость такого подогревателя (без налогов, стоимости транспортировки, стоимости монтажа) по данным за 2007 год равняется 1.35800 EURO. Фактически срок службы подогревателя составляет не более 5-ти лет.

Расчёт срока окупаемости воздухоподогревателя фирмы ALSTOM.

1. Исходные данные.

1.1. Стоимость воздухоподогревателя:

1358000 EURO \times 68 = 92344тыс.руб.

1.2. Стоимость газа с НДС по состоянию на июль 2016 года – 4800руб. за 1000нм³ газа.

1.3. Расход природного газа в реактор – 1000нм³/час. Время работы реактора в течении года—7200час.

1.4 Экономия газа, используемого в реакторе при получении техуглерода, за счёт повышения температуры воздуха с 500 до 800°С. составляет 20%.

2. Расчёт.

2.1. Годовая экономия природного газа составит:
(1000 \times 0,20 \times 7200) \times 4800 /1000 = 6912тыс. руб.

2.2.Общий экономический эффект от внедрения мероприятия возрастёт на 8– 10% за счёт экономии возду-

ха и воды. Примем увеличение экономического эффекта на 10%, тогда общий экономический эффект составит: $6912 \times 1,1 = 7603$ тыс.руб.

2.3.Срок окупаемости мероприятия: $92344/7603 = 12,1$ года.

Примечание: В расчёте не учитывалось увеличение производительности реактора, так как эти возможности в настоящее время исчерпаны за счёт внедрения других мероприятий, и производительность реакторов ограничивается только мощностями отделения обработки.

Произведя аналогичный расчёт для Белоруссии при стоимости природного газа для промышленных предприятий 219дол США можно убедиться, что срок окупаемости такого воздухоподогревателя составит 5,3 года. Для того, чтобы использование этого подогревателя приносило осязаемый экономический результат, его целесообразно устанавливать только на тех заводах техуглерода, которые приобретают природный газ по цене не ниже 350 EURO. Это относится к большинству заводов ЕС. Что касается заводов техуглерода, находящихся в странах СНГ, и особенно в России, то приобретать подогреватели фирмы ALSTOM в настоящее время не выгодно из за низкой стоимостью природного газа, в связи с чем срок окупаемости такого аппарата превысит нормативный срок его службы.

2.1.2. Использование системы подогрева Омского завода технического углерода.

Система подогрева ОЗТУ включает высокотемпературный воздухоподогреватель ВПВ–235 и воздухоподогреватель первой ступени ПВ-74(ПВ-92). Технические характеристики их будут даны в следующем разделе. Ранее указывалась стоимость этой системы подогрева в первые годы её изготовления ремонтными службами ОЗТУ. С 2012 года подогреватель ВПВ–235 изготавливается на заводе ОЗНО (Озёрский завод нестандартного оборудования). Это связано с тем, что необходимо было улучшить качество сварки при изготовлении подогревателя. Стоимость его значительно возросла и составляет в настоящее время 12200тыс. руб. Стоимость всей системы подогрева с учётом изготовления подогревателя первой ступени (ПВ-74) на заводах техуглерода, не превысит 15000тыс. руб. Тогда срок окупаемости системы обогрева при применении её на российских заводах техуглерода составит: $15000/7603=1,97$ года. Срок окупаемости этой системы обогрева при внедрении её на заводах Беларуси не превысит 10 месяцев. В связи с планируемым постоянным повышением стоимости газа в Российской Федерации эффективность мероприятий, направленных на сокращение потребления природного газа на заводах техуглерода России и Беларуси, будет только возрастать. Срок окупаемости этой системы при применении её на заводах техуглерода зарубежных фирм с учётом действующих на этих предприятиях ценах на природный газ составил бы 4–5 месяцев. Это хорошо поняли технические специалисты фир-

мы Colambian после посещения Омского завода технического углерода. Фирма неоднократно обращалась к собственникам завода с просьбой о продаже высокотемпературного воздухоподогревателя. При этом нужно понимать, что эти подогреватели нужны фирме Colambian для замены воздухоподогревателей с температурой подогрева воздуха 450–500⁰С., используемых до сих пор на устаревших заводах. Заводов техуглерода, использующих устаревшее оборудование, в странах западной европы ещё достаточно много. Все они находятся в сложном положении, так как реконструкция с использованием самого современного оборудования требует замены всего оборудования заводов и увеличения территории предприятий, а к повышению технического уровня заводов за счёт частичной замены оборудования они оказались не подготовленными.

2.1.3. Подогрев воздуха при получении каркасных марок техуглерода.

На лучших зарубежных заводах по производству техуглерода для подогрева воздуха, подаваемого в реакторы при получения каркасных (полуактивных) марок техуглерода, применяются так же воздухоподогреватели фирмы ALSTOM. Как видно из рекламных материалов фирмы SHACK®(ALSTOM) и доклада James F. Geisler на 11-ой Международной конференции по техническому углероду (Рим ноябрь 2010г.) на установках по производству технического углерода для протекторного (твёрдого) техуглерода

применяются, как правило, воздухоподогреватели с температурой подогрева 800°C ., а для каркасного (мягкого) техуглерода используются воздухоподогреватели с температурой подогрева 650°C .. И, если для производства протекторных марок техуглерода продолжается разработка и внедрение подогревателей с температурой подогрева до 900 и даже до 950°C ., то при производстве каркасного техуглерода, напротив, устанавливаются ограничения по верхнему пределу нагрева воздуха, подаваемого в реактор – 800°C .. Это связано с температурой возгорания техуглерода этих марок. Фактически это означает, что по соображениям техники безопасности температуру нагрева воздуха при выпуске каркасных марок техуглерода (N550, N660 и др.) нужно поддерживать не выше 750°C .. Омский завод техуглерода в 2001–2004 годах основные усилия направил на подогрев воздуха, подаваемого в реакторы для получения протекторных марок техуглерода, прежде всего потому, что это даёт значительно больший экономический эффект, чем эффект от подогрева воздуха, используемого для получения каркасных марок техуглерода. Кроме того, при внедрении новых подогревателей в производстве каркасных марок техуглерода возникают дополнительные сложности в связи с высокой склонностью этих марок техуглерода (серий 500 и 600) к отложениям на внутренней поверхности труб подогревателей. В общем, это было связано с обеспечением рационального использования имеющихся ресурсов.

Конечно, принимались меры для повышения температуры подогрева воздуха в производстве техуглерода N550 и N660 без значительных затрат. Так, были установлены рубашки на газоохладители для предварительного подогрева воздуха, были установлены подогреватели ПВ-74 в качестве первой ступени подогрева воздуха, подаваемого в реакторы. В результате осуществления этих мер температура воздуха была увеличена с 500 до 630–650°C. Однако существенного уменьшения отложений техуглерода на поверхности труб подогревателей добиться не удалось. Требовалась их периодическая очистка. Понятно, что повышение температуры воздуха оправдывало те вложения, которые были затрачены на установку ПВ-74 (срок окупаемости менее 0,5 года при увеличении температуры подогрева воздуха от 500 до 600°C), но в то время, как уже указывалось, гораздо выгоднее было использовать имевшиеся финансовые средства для подогрева воздуха в производстве протекторных марок техуглерода. В настоящее время для подогрева воздуха, подаваемого в реакторы для получения каркасных марок техуглерода, начинают использоваться и воздухоподогреватели фирмы “ИНЖЕНЕРИНГ“ г. Ярославль, изготавливаемые на заводе ОЗНО. Разработчик в технической документации указывает конечную температуру подогрева воздуха 700°C., что должно позволить увеличить температуру подогрева воздуха на некоторых заводах при получении каркасных марок техуглерода с 500 до 700°C. При стоимости воздухоподо-

гревателя с учётом транспортных расходов и затрат на монтаж 22млн.руб, окупаемость воздухоподогревателя составит: $22000000 / (0,12 \times 7200 \times 4800) = 5,3$ года, где 4800 – цена за 1000 нм^3 газа; 7200 – количество часов работы подогревателя в течение года; 0,12тыс. $\text{нм}^3/\text{час}$. – часовая экономия газа в реактор ($120 \text{ нм}^3/\text{час}$).

Понятно, что срок окупаемости подогревателя 5,3 года скорее всего превысит срок его службы, тем более, что температура подогрева воздуха в процессе эксплуатации будет снижаться, что понизит экономический эффект от применения подогревателя. Так, понижение температуры подогрева воздуха на 50°C . увеличит срок окупаемости аппарата до 6,4 года. Применение такого подогревателя на Омском и Ярославском заводах нецелесообразно, так как срок окупаемости подогревателя превысит срок его службы .

2.2. Технические характеристики воздухоподогревателей.

В этом разделе будут показаны технические данные различных воздухоподогревателей, используемых в промышленности тухглерода.

2.2.1. Прежде всего, нужно рассмотреть характеристики наиболее распространённых подогревателей воздуха фирмы ALSTOM. В источнике /2.3.1./ на стр. 76–77 показана схема и описание этого подогревателя. Указывается, что принципиальная конструкция его известна с начала 60-х годов прошлого века /2.7.5./ стр. 195–196. Если точнее, то в этом источнике даётся ссылка на статью 1958 года, в кото-

рой указывается, что такие подогреватели работают устойчиво, используется противоточная схема, воздух нагревается до 750°C . при температуре газов на входе в подогреватель 1200°C . Так же как и в современных конструкциях имеется двойное дно, в результате чего плита и нижние концы труб омываются холодным воздухом. Нижняя плита футеруется огнеупорным бетоном. Свободное удлинение всех труб, предохраняющее как трубы, так и плиты от напряжений из-за температурных деформаций, достигается свободным перемещением всех труб в верхней доске, уплотняя их поршневыми кольцами. В современных воздухоподогревателях фирмы ALSTOM, выпускаемых для заводов технического углерода, компенсация температурных удлинений обеспечивается за счёт установки на каждой трубе линзового компенсатора. Применяются компенсаторы так же на корпусе подогревателя и на газоходе после подогревателя, на котором устанавливается специальный пилообразный компенсатор, что способствует не только компенсации термического расширения между воздухоподогревателем и газоходом, но способствует уменьшению отложений на поверхности труб подогревателя. Предусмотрено использование паровой продувки подогревателей для удаления отложений техуглерода в трубах. Продувка осуществляется струями пара со сверхзвуковой скоростью через сопла Лаваля под давлением 10 бар. При этом, если для протекторных марок техуглерода предусматривается периодическая продувка труб, то для подогре-

вателей, используемых в производстве каркасных марок техуглерода, предусматривается постоянная продувка при одновременной продувке 10% труб. Продувка труб производится с использованием программированного логического контроллера. Автоматизирована и подача воздуха для охлаждения нижней трубной доски. Количество воздуха для обдувки составляет 10–20% от общего объёма воздуха, подаваемого в воздухоподогреватель/2.7.6./.

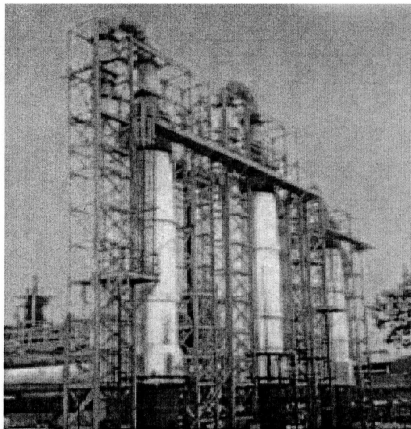
На рис.2.1. схематично показан воздухоподогреватель Schack® (ALSTOM) и установка воздухоподогревателей на линиях по производству протекторного и каркасного техуглерода, откуда видна разница в габаритах подогревателей, что дополнительно указывает на существенно более низкую температуру подогрева воздуха при получении каркасных марок техуглерода. На схеме дано и краткое описание работы воздухоподогревателя.

2.2.2. Китайская компания DORIGHT Co., Ltd. Выпускает 4 серии подогревателей для нагрева воздуха на установках по производству техуглерода до 600°C., 650°C., 800°C. и 950°C. Первые две серии предназначены для установок по производству каркасного техуглерода, подогреватели с температурой подогрева воздуха до 800 и 950°C. используются при производстве протекторных марок техуглерода. Воздухоподогреватели с температурой подогрева воздуха 800 и 950°C. также как и подогреватели «ALSTOM» имеют двойное дно для охлаждения нижней трубной доски, доска также

футеруется огнеупорным бетоном. Компания рекламирует новую конструкцию подогревателя, трубы которого установлены с зазором для возможности их свободного удлинения при нагревании, однако не указывается, как обеспечивается герметичность в месте входа трубы в верхнюю трубную решётку. В первых подогревателях такой конструкции для этой цели применяли поршневые кольца, о чём было сказано ранее/2.7.5./.

Что касается конструкции воздухоподогревателей, используемых при получении каркасных марок техуглерода, то конструкция их не указывается в рекламных проспектах фирмы. Следует отметить, что воздухоподогреватели этой китайской компании выпускаются в основном для внутреннего потребления.

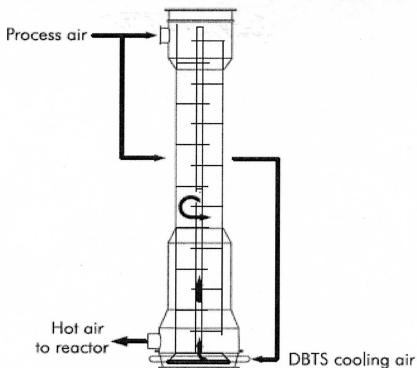
Рис 2.1.



Воздухоподогреватель Schack® на линиях по производству твёрдого и мягкого техуглерода

Воздухоподогреватели Schack®, используемые в производстве техуглерода, сконструированы так, что высокотемпературный аэрозоль проходит через трубы, а воздух для горения направляется по межтрубному пространству с помощью перегородочных пластин.

Большая часть воздухоподогревателей Schack®, оборудована двойной нижней трубной доской (DBTS), охлаждаемой частью воздуха, подлежащего нагреву. Воздух, использованный для охлаждения нижней трубной доски, поступает в основной воздушный поток внутри воздухоподогревателя без отвода во внешнюю среду.



Воздухоподогреватель Schack® с предусмотренным возвращением охлаждающего воздуха в процесс

2.2.3. Воздухоподогреватель Ярославской фирмы ОО«ТЕХИНЖЕНЕРИНГ», изготавливаемый заводом ОЗНО, является упрощённой копией подогревателя ALSTOM. Подогреватель рассчитан на подогрев воздуха до 700°C . при выпуске каркасных марок техуглерода. На двух технологических потоках российских заводов такие подогреватели установлены и эксплуатируются. Для определения надёжности работы подогревателей пока недостаточно данных. Следует отметить, что в отличие от места установки подогревателей фирмы ALSTOM этот подогреватель монтируется на нисходящей ветви колонки реактора. *Впервые такая установка основного воздухоподогревателя была применена на Омском ЗТУ ещё в 1976 году для повышения надёжности воздухоподогревателя/2.7.1./ стр.78.Рис.4.5. Это исключает попадание капель воды на трубную решётку подогревателя. Кроме того, движение запылённых газов по трубам в нисходящем направлении способствует уменьшению отложения пыли на внутренней поверхности труб/2.7.5./.* Установка этого подогревателя на нисходящей ветви колонки реактора стала возможна благодаря тому, что масса его значительно меньше массы подогревателя фирмы ALSTOM (20т. против 44,5т.).

2.2.4. На Рис.2.2показана схема подогрева воздуха, применяемая на ОЗТУ в производстве каркасных марок техуглерода (серий 500 и 600).

Рис. 2.2.

I



Рассматривая температурные параметры этой системы подогрева воздуха можно сделать вывод, что происходит постепенное забивание внутренней поверхности газоохладителя и затем труб подогревателя ПВ-74. При чистых стенках газоохладителя температура воздуха после газоохладителя обычно составляет 105–115°C., а температура воздуха после ПВ-74 находится в пределах 230–260°C., что обеспечивает конечную температуру подогрева воздуха 650°C. Принципиально эта схема подогрева воздуха, подаваемого в реактор, не отличается от системы подогрева воздуха, применяемой в производстве протекторного (активного) техуглерода. Отличие, прежде всего, заключается в том, что в качестве основного подогревателя используется подогреватель ПВ-185 без изменения его конструкции и места установки, а увеличение подогрева воздуха достигается за счёт установки дополнительного подогревателя первой ступени на нисходящей ветви колонки реактора. В качестве дополнительного подогревателя применяются подогреватели ПВ-74 или ПВ-92 конструкции ОЗТУ. Общий вид подогревателя ПВ-74 показан в источнике /2.3.1/ стр.81, рис.4.8. Подогреватель ПВ-92 отличается от ПВ-74 только длиной труб и большей поверхностью нагрева. Необходимо отметить, что для улучшения компенсационных возможностей подогревателя ПВ-74 двухлинзовый компенсатор был заменён на трёхлинзовый. Как показал опыт эксплуатации воздухоподогревателей, не имеющих индивидуальных компенсаторов на каждой

трубе, для компенсации температурных напряжений, возникающих в трубном пучке, необходимо на корпусе подогревателя устанавливать трёхлинзовый компенсатор. Нужен компенсатор и на газоходе после ПВ–74 (ПВ–92). Начиная с 2004-го года все воздухоподогреватели ОЗТУ изготавливаются с трёхлинзовыми компенсаторами (рис.2.3.). Следует также отметить, что при изготовлении подогревателей ремонтными службами заводов техуглерода компенсаторы следует приобретать в организациях, специализирующихся на их изготовлении, а не изготавливать на заводах, так как компенсаторы являются важнейшим элементом, обеспечивающим надёжность работы воздухоподогревателей и систем подогрева воздуха. Что касается причин осаждения техуглерода на поверхностях труб и газоохладителей, то об этом будет сказано подробно в следующих разделах, хотя и при беглом рассмотрении Рис.2.2. понятно, что начало забивания внутренней поверхности аппаратов связано с понижением температуры воздуха после газоохладителя. Только обеспечив стабильную температуру воздуха после газоохладителя на уровне 130–160°С. можно значительно снизить количество отложений на внутренней поверхности аппаратов и обеспечить их продолжительную работу без очистки труб.

2.2.5. Далее необходимо рассмотреть эксплуатируемую длительное время на Омском заводе технического углерода систему подогрева воздуха, обеспечивающую нагрев воздуха, подаваемого в реактор, до 780–820°С.

На Рис.2.3. показана схема подогрева воздуха, используемая на ОЗТУ в производстве протекторных (активных) марок техуглерода.

ВЛВ-235



Рис.2.3.

Если сравнить эту схему обвязки подогревателей со схемой, используемой до 2004-го года /2.7.1./ стр.80, то в данной схеме воздух сначала подаётся в подогреватель ПВ–74 и только затем в прямоточную секцию ВПВ–235. При такой обвязке снижается вероятность забивания труб ВПВ–235, так как повышается средняя температура стенок труб в прямоточной секции подогревателя ВПВ–235. *Для улучшения работы данной системы подогрева воздуха целесообразно предварительно нагреть воздух в рубашках газоохладителей, что позволит увеличить конечную температуру подогрева воздуха и исключить отложения техуглерода на внутренней поверхности труб подогревателей.* В связи с тем, что система подогрева воздуха Омского ЗТУ широко используется на практике (только на ОЗТУ она применяется на восьми потоках по производству протекторных марок техуглерода), будет полезно рассмотреть особенности её эксплуатации.

2.3. Условия эксплуатации воздухоподогревателей и систем подогрева воздуха Омского завода технического углерода.

Системы высокотемпературного подогрева воздуха, разработанные специалистами Омского ЗТУ, состоят из воздухоподогревателя ПВ–74, изготовленного из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т и высокотемпературного воздухоподогревателя ВПВ–235, изготовленного из жаропрочной

стали 10X23H18. Допустимая температура применения стали 12X18H10T составляет 750°C ., температура применения стали 10X23H18 равна 1000°C .. Поэтому для изготовления высокотемпературных воздухоподогревателей и применяют такую сталь. Возможность применения других марок стали для изготовления высокотемпературных воздухоподогревателей будет рассмотрена в другом разделе.

Схема обвязки воздухоподогревателей показана на Рис.2.3.

Холодный воздух с температурой $20\text{--}70^{\circ}\text{C}$.(Т-4) подаётся в межтрубное пространство подогревателя ПВ-74 противотоком по отношению к движению газов, нагревается в подогревателе до $250\text{--}350^{\circ}\text{C}$.(Т5) и поступает в прямоточную секцию воздухоподогревателя ВПВ-235 (или ВПВ-250), где дополнительно нагревается до $350\text{--}450^{\circ}\text{C}$.(Т6) и направляется в основную противоточную часть ВПВ-235 (250), где нагревается до $750\text{--}820^{\circ}\text{C}$ (Т7) и далее поступает в реактор. Нагрев воздуха осуществляется углеродогазовой смесью, которая с температурой $930\text{--}950^{\circ}\text{C}$.(Т1) поступает из реактора в воздухоподогреватель ВПВ-235, охлаждается в нём до $650\text{--}720^{\circ}\text{C}$.(Т2) и затем противотоком проходит подогреватель ПВ-74, охлаждаясь до $550\text{--}600^{\circ}\text{C}$.(Т3) и далее поступает в коллектор углеродогазовой смеси и направляется в аппараты улавливания после дополнительного охлаждения в газоохладителе и затем в холодильнике за счёт впрыска воды. Следует отметить, что кроме подогревателя ПВ-74 в каче-

стве подогревателей первой ступени использовались воздухоподогреватели ПВ–92 и ПВ–125. Подогреватель ПВ–92 по сравнению с воздухоподогревателем ПВ–74 имеет большую поверхность нагрева (92м^2) за счёт длины труб и более высокую температуру подогрева воздуха. Воздухоподогреватель ПВ–120 изготавливался из труб $57\times 3,5$ и эксплуатировался в течение 3-х лет при выпуске техуглерода серий 300 и 200 без аварий, обеспечивая более высокую температуру подогрева воздуха по сравнению с ПВ–74. Однако эти подогреватели больше не изготавливались, так как, по мнению технических специалистов ОЗТУ, в подогревателях первой ступени для уменьшения отложения техуглерода в трубах необходимо в соответствии с зарубежным опытом применять трубы с внутренним диаметром не менее 80мм./2.7.1.стр.77/.

2.3.1. Контроль технологических параметров высокотемпературного подогрева воздуха.

Температура углеродогазовой смеси перед воздухоподогревателем ВПВ–235(250) должна поддерживаться в пределах $930\text{--}950^\circ\text{C}$. Учитывая важность этого параметра, измерение температуры осуществляется двумя термопарами. Термопары должны располагаться диаметрально по отношению друг к другу. При появлении расхождений в результатах измерений необходимо срочно организовать проверку термопар.

Температура углеродогазовой смеси после подогревателя ВПВ–235 должна находиться в пределах $650\text{--}730^\circ\text{C}$. Значе-

ние этой температуры зависит от объёма нагреваемого воздуха и от состояния труб воздухоподогревателя. При повышении температуры после ВПВ–235(250) выше 730°C . необходимо провести продувку воздухоподогревателя продуктами полного сгорания. В случае, если продувка не даст результата, нужно останавливать реактор для проверки воздухоподогревателя.

Конечная температура подогрева воздуха должна составлять $770\text{--}830^{\circ}\text{C}$. при понижении температуры воздуха менее 760°C . необходимо также продуть воздухоподогреватель продуктами полного сгорания.

Понижение конечной температуры воздуха и повышение температуры углеродогоазовой смеси после основного воздухоподогревателя указывают на частичное забивание труб воздухоподогревателя, вследствие чего ухудшается теплоотдача от газа к воздуху. Это приводит к тому, что воздух хуже нагревается, а газ (углеродогоазовая смесь) соответственно хуже охлаждается. При этом первым признаком частичного забивания труб воздухоподогревателя является повышение температуры углеродогоазовой смеси на выходе из ВПВ–235(250). Температура же воздуха будет снижаться постепенно, так как при повышении температуры после ВПВ–235, а значит и на входе в ПВ–74, повысится температура воздуха после подогревателя ПВ–74, то есть перед подогревателем ВПВ–235, что будет частично компенсировать ухудшение нагрева в самом ВПВ–235. Если температура газов после

ВПВ–235 будет и далее повышаться, следует продуть систему подогрева продуктами полного сгорания. Следует учитывать и то обстоятельство, что при температуре после ВПВ–235 более 750°C . возможно нарушение целостности ПВ–74 (вырыв одной и или нескольких труб из верхней трубной доски). В этом случае происходит покраснение или прогар металла на отводе между ВПВ–235(250) и ПВ–74. Направленная струя воздуха вызывает местное горение газа. В этом случае реактор нужно немедленно остановить для замены или ремонта ПВ–74.

Аппарат ВПВ–235(250) изготавливается из жаропрочной ограниченно свариваемой стали, поэтому в процессе эксплуатации возможно нарушение сварочных швов и проникновение воздуха в газовое пространство непосредственно перед трубной доской, что может привести к горению газов перед трубной доской и даже в самих трубах. В этом случае увеличивается температура воздуха при неизменной температуре газов перед воздухоподогревателем за счёт местного горения газов непосредственно перед трубной доской. Поэтому при разности температур перед воздухоподогревателем ВПВ–235(250) и конечной температурой подогрева воздуха менее 100°C . реактор нужно остановить для проверки воздухоподогревателя ВПВ–235(250).

Таким образом, во избежание вывода из строя дорогостоящего оборудования и обеспечения подогрева воздуха в пределах $750\text{--}830^{\circ}\text{C}$. необходимо соблюдать следующие усло-

вия:

1. Обеспечить достоверный контроль температуры углеводородной смеси перед высокотемпературными воздухоподогревателями ВПВ–235(250) с использованием двух термомпар, расположенных на одном уровне диаметрально по отношению друг к другу (Т1). При расхождении в показаниях термомпар срочно организовать их проверку. Необходимо проверить, все ли водяные форсунки в зоне заделки находятся в работе.

2. Обеспечить периодический контроль температуры газов после воздухоподогревателей (Т2).

3. Осуществлять продувку воздухоподогревателя ВПВ–235(250) при повышении температуры газов после него (Т2) более 750°C ., а также при понижении конечной температуры подогрева воздуха (Т6) менее 760°C ..

4. Контролировать разницу между температурой углеводородной смеси перед воздухоподогревателем ВПВ–235 (Т1) и конечной температурой подогрева воздуха (Т6). При разнице этих температур менее 105°C .. информировать об этом руководство цеха. При уменьшении разницы этих температур до 100°C .. (например, температура газов перед ВПВ–235 составляет 930°C ., а конечная температура воздуха равна 830°C .) реактор нужно останавливать для проверки воздухоподогревателя.

5. При любом переводе реактора на режим полного горе-

ния необходимо продуть систему подогрева, увеличив количество воздуха, подаваемого в реактор.

2.4. Конструктивные недостатки воздухоподогревателей, применяемых в промышленности технического углерода.

2.4.1. Начать следует с воздухоподогревателя предварительного подогрева воздуха ПВ-74. Как уже отмечалось ранее, /2.7.1./ первоначально на корпусе подогревателя предусматривалась установка двухлинзового компенсатора. Однако в связи с увеличением диаметра труб подогревателя значительно возрастает напряжение сжатия труб при нагревании, что снижает надёжность подогревателя при резких изменениях температуры углеродогазовой смеси. Поэтому в конструкцию подогревателя были внесены изменения, и двухлинзовый компенсатор был заменён трёхлинзовым. Напряжение сжатия возрастает и от массы труб, то есть, чем больше толщина труб, тем больше вероятность вырывания отдельных труб из верхней трубной решётки /2.3.5./. Это происходит при резком изменении температуры углеродогазовой смеси (при аварийных ситуациях и нарушениях инструкций по пуску и остановке реакторов.). В подогревателе ПВ-74 применены трубы 76×5, что приводит не только к ухудшению условий эксплуатации подогревателя, но и увеличивает массу подогревателя на 140кг по сравнению с применением труб 76×4 и на 210кг в случае использования труб 76×3,5, то есть на 7–10%. Тем не менее, эти подогреватели представляли собой необходимый элемент систе-

мы подогрева воздуха и совместно с подогревателем ВПВ–235 обеспечили нагрев воздуха, подаваемого в реактор, до 750–820°C. Необходимо отметить, что толщина труб выбиралась разработчиками конструкции подогревателя с учётом применения на заводе устаревшего сварочного оборудования при изготовлении подогревателей. Подогреватели ПВ–74 давно уже себя окупили и в настоящее время для дальнейшего повышения температуры воздуха, подаваемого в реакторы, требуются подогреватели предварительного подогрева с большей поверхностью нагрева, большим диаметром труб и, желательно, с применением индивидуальных компенсаторов для каждой трубы. Необходимо отметить, что увеличение диаметра труб подогревателя не обязательно приводит к увеличению их массы. Так, труба 89×4 имеет массу даже несколько меньше, чем труба 76×5. Поэтому для подогревателя предварительного подогрева воздуха целесообразно применить трубы 89×4 с внутренним диаметром 81мм, как это распространено при изготовлении подогревателей для промышленности технического углерода за рубежом/2.7.1./стр.77. Диаметр подогревателя не должен быть менее 1200мм.

2.4.2. Воздухоподогреватель ВПВ–235 – основной подогреватель в системе подогрева воздуха, подаваемого в реакторы для получения протекторных марок техуглерода. На рис. 2.4. показана схема высокотемпературного подогревателя ВПВ–235. Воздухоподогреватель ВПВ–235 состоит из

корпуса, трубного пучка, перегородок, направляющих поток воздуха, входного и выходного воздушных патрубков прямоточной и противоточной секций, соединённых трубопроводом. Прямоточная и противоточная секции разделяются диафрагмой, препятствующей перетоку воздуха из прямоточной секции в противоточную во избежание понижения конечной температуры воздуха. Воздух, нагретый до 250–350°С. в подогревателе ПВ–74, направляется в прямоточную секцию воздухоподогревателя ВПВ–235, дополнительно нагревается до 350–400°С. и по соединительному трубопроводу поступает в противоточную секцию подогревателя, где нагревается до 750–820°С. Схема движения теплоносителей показана на Рис. 2.5. Более подробная информация о нагреве воздуха в системе подогрева, в том числе в воздухоподогревателе ВПВ–235, дана в разделе 2.2.(п.2.2.5.) и разделе 2.3. Главный недостаток воздухоподогревателя ВПВ–235 (также как и ВПВ–250) заключается в том, что подогреватели имеют трубы малого диаметра (Двн.33мм и 36мм соответственно), что способствует отложению техуглерода на стенках труб. Однако, отложения происходят и на трубах значительно большего диаметра (Двн.80–100мм.). Это хорошо известно из зарубежного опыта. Поэтому в воздухоподогревателях фирмы ALSTOM предусмотрена продувка труб паром со сверхзвуковой скоростью. Это сложная и дорогая система и для подогревателей типа ВПВ–235(250) не применима.

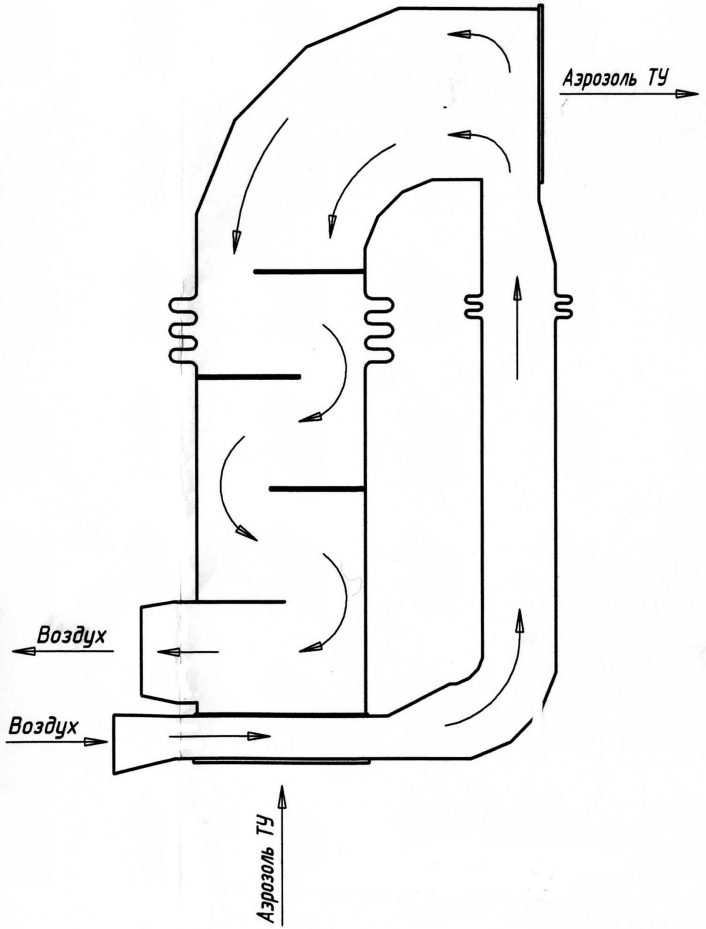
Трубы подогревателя ВПВ–235 изготавливается из жаро-

прочной стали 10X23H18, которая может эксплуатироваться при температуре до 1000⁰С., тогда как трубные решётки, диафрагма и корпус подогревателя изготавливаются из стали 20X23H18, температура применения которой допускается по справочникам до 1050 – 1100⁰С. В этих данных присутствует неопределённость. Поэтому нижнюю трубную решётку желательно изготавливать из стали 20X25H20C2, для которой температура применения 1100⁰С. гарантируется. Кроме того эта сталь более коррозионностойкая по сравнению со сталью 20X23H18. Следует отметить, что сталь типа 20X25H20C2 с содержанием хрома 25% и никеля 20% используется за рубежом для изготовления труб воздухоподогревателей. Необходимо также отметить, что предварительный подогрев воздуха уменьшает коррозионное воздействие газовой среды на металл нижней трубной решётки и трубы воздухоподогревателя. Это объясняется тем, что температура газов в отдельных трубах в зонах подачи холодного воздуха может понизиться до 160⁰С. и ниже, что для газов, содержащих сернистые соединения, приведёт к конденсации влаги.

Высказ

(no m

Схема движения теплоносителей



.Рис.2.5.

2.4.3. Воздухоподогреватель фирмы Alstom спроектирован и изготавливается на высоком техническом уровне и обеспечивает нагрев воздуха при получении протекторных марок техуглерода до 800–900°С. К недостаткам следует прежде всего отнести большую массу подогревателей (44,5 т. составляет масса подогревателя для нагрева воздуха до 800°С.), что требует существенных затрат на установку и обвязку воздухоподогревателя, а это дополнительно увеличивает срок его окупаемости. Наличие системы продувки труб струями пара со сверхзвуковой скоростью, а также системы регулирования подачи воздуха на обдувку нижней трубной доски усложняет обслуживание подогревателя.

2.4.4. Воздухоподогреватели Китайской фирмы DORJHT Co., Ltd. также имеет большую массу, что затрудняет их монтаж и ремонт. Подогреватели выпускаются с различным диаметром труб от 89 до 126 мм. Однако проблема забивания труб остается. Компания рекламирует конструкцию подогревателя, в котором трубы свободно перемещаются в трубной решётке при температурных расширениях. Если это действительно так, такой аппарат можно приобрести при наличии гарантии обеспечения герметичности и возможности установки такого аппарата на действующих потоках.

2.4.5. Что касается воздухоподогревателя ВПВ–235, то о его недостатках уже было сказано. Два из них было исправлено. Изготовление этих подогревателей передано в специализированную организацию по изготовлению нестандартного оборудования, и в отношении качества сварочных швов не должно возникать проблем. Значительно снизились и отложения на стенках труб воздухоподогревателя за счёт предварительного подогрева воздуха перед подачей его в воздухоподогреватель ВПВ–235. Как показано на рис 2.3., воздух поступает в первую секцию ВПВ–235 с температурой 250–350°С., что повышает температуру стенок труб секции выше 600°С. При такой температуре отложений на внутренней поверхности труб не может происходить даже при диаметре труб 33–36мм. Однако, в периоды пуска и остановки технологических потоков вероятность отложения техуглерода на внутренних стенках труб воздухоподогревателя ВПВ–235 всё же остаётся.

2.5. Основные причины забивания труб воздухоподогревателей.

Учитывая, что проблема закупоривания труб воздухоподогревателей касается всех заводов техуглерода, необходимо определить причины этого явления.

Как известно из зарубежных источников, во избежание отложения техуглерода на внутренних поверхностях труб воздухоподогревателей нужно поддерживать температуру стенок труб не ниже 220°С. Однако практика показала, что

забывание труб происходит и при более высокой температуре стенок /2.7.1./стр85. Температура стенок труб воздухоподогревателя определяется из основного уравнения теплообмена:

, где

$t_{ст}$ – температура стенки.

$t_{г}$ и $t_{в}$ – соответственно температуры газов и воздуха.

$\alpha_{в}$ и $\alpha_{г}$ —коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха и со стороны газов в $Вт/(м^2 \cdot град)$.

Чем меньше соотношение $\alpha_{в}/\alpha_{г}$, тем температура стенки ближе к температуре углеродогазовой смеси и наоборот, чем выше это соотношение, тем ниже температура стенки. Расчёты коэффициентов теплоотдачи производятся с применением критериев подобия – Рейнольдса(Re), Нуссельта(Nu), Прандтля(Pr). Используются различные коэффициенты и номограммы. Понятно, что коэффициенты теплоотдачи сложно определить, да и точность результата нельзя гарантировать. На практике определение коэффициентов теплоотдачи не обязательно. Нужно знать основные параметры от которых они зависят. По данным/2.7.4./ коэффициент теплоотдачи может быть определён по следующей расчётной формуле:

$$\alpha = (1,163 \times A \cdot (w \cdot \rho \cdot d)^{0,8} / d) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}),$$

где w и ρ фактическая скорость и плотность движущегося газа (воздуха), определяемые по средней его температуре; d – приведённый диаметр, м;

A – поправочный множитель.

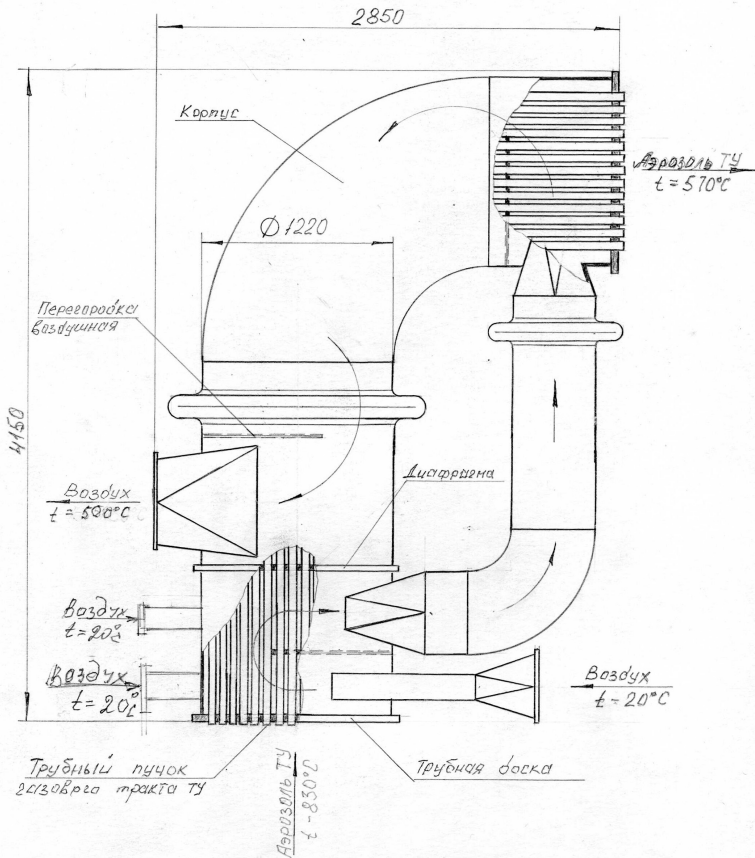
Значение A определяется по графику (рис.16), а значение выражения $(w\#d)^{08}$ по номограмме (рис. 17), приведённых в приложении.

Из формулы ясно, что чем выше скорость воздуха и его плотность, тем выше коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха (α_v), тем больше тепла отнимается от наружной поверхности трубы и тем ниже температура её стенки. Понятно, что наиболее низкая температура стенок труб будет в тех зонах воздухоподогревателей, где подаётся холодный воздух с температурой 10–40°C. (плотность 1,247– 1,128 кг/м³) и высокой скоростью (15–20м/сек.). Такими зонами являются участки ввода холодного воздуха в воздухоподогреватели ПВ–185, ВПВ–235, ПВ–74 (92), ПВ–125, ВПВ–250. Поступление холодного воздуха при этих условиях приводит к локальному понижению температуры стенок первых рядов труб по ходу движения воздуха. После того, как эти трубы частично или полностью закупорятся техуглеродом, создадутся условия для охлаждения следующих рядов труб. Локальные (местные) коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха α_v могут значительно отличаться от средних значений этих коэффициентов в подогревателях, что в значительной мере определяет локальное понижение температуры стенок труб воздухоподогревателей, что способствует отложению техуглерода на внутренней поверхности труб. Из приведённой расчётной формулы следует, что для того, чтобы

понизить коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха и увеличить температуру стенок труб в зонах подачи воздуха в подогреватели, нужно уменьшить скорость воздуха (w), понизить плотность воздуха (ρ) и увеличить диаметр труб (d). Чтобы уменьшить скорость воздуха в локальных зонах нужно часть воздуха подать в другие зоны воздухоподогревателя. В случае подогревателей ПВ–74(92) и ПВ–125 не сложно организовать подачу воздуха не через один, а через 3 или 4 патрубка, расположенных на одном уровне. В результате скорость воздуха в зонах его подачи уменьшится пропорционально количеству патрубков, соответственно понизятся локальные (местные) коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха (α_w) и повысится температура стенок труб в местах ввода воздуха. В конечном итоге уменьшатся отложения углерода на внутренних поверхностях труб подогревателей. Дополнительные патрубки можно установить и на подогревателе ПВ185, как это показано на Рис 2.6.

Рис. 2.6.

Подогреватель воздуха ПВ-185



Воздух подогреватель ПВ-185

По тракту аэрозоля ТУ - 313 труб $\Phi 42 \times 4,5$

Как показано на Рис.2.6. дополнительно к основному патрубку подачи воздуха можно установить один или два воздушных патрубка, что приведёт к уменьшению скорости воздуха в зоне его основной подачи, повышению температуры стенок труб и, как следствие, уменьшению отложений техуглерода в трубах воздухоподогревателя. Как известно, в воздухоподогревателях фирмы ALSTOM воздух для равномерного охлаждения как нижней трубной решётки, так и начального участка трубного пучка подаётся по нескольким трубопроводам (Рис.3.2). При этом для охлаждения трубной доски подаётся только 20% воздуха, поступающего в воздухоподогреватель. Основная часть воздуха (80%) поступает противотоком непосредственно в воздухоподогреватель.

Рис.2.7.



Рассматривая систему воздушного охлаждения нижней трубной доски (решётки) воздухоподогревателя фирмы ALSTOM и известные данные об эксплуатации этого подогревателя можно прийти к выводу, что даже равномерное распределение воздуха по периметру трубного пучка и низкой скорости воздуха в местах его подачи в камеру для охлаждения нижней трубной решётки, полностью избежать отложений техуглерода в трубах подогревателя не удаётся. Из камеры для охлаждения трубной решётки воздух по отдельной трубе поступает в основной воздушный поток внутри подогревателя /Рис.2.1./.

Камеру для охлаждения нижней трубной доски в технической литературе называют сдвоенной трубной решёткой, а также двойным дном.

Специалисты Омского завода технического углерода для уменьшения отложений на внутренней поверхности труб высокотемпературных воздухоподогревателей использовали систему предварительного подогрева воздуха. Впервые такая система была внедрена на ОЗТУ ещё в 1976 году. В результате предварительного нагрева воздуха до 130–150⁰С. удалось повысить конечную температуру его подогрева на 130–190⁰С. и исключить отложения техуглерода на поверхности труб основного воздухоподогревателя (ПВ–88), что до внедрения двухстадийной системы подогрева приводило к забиванию труб ПВ–88 техуглеродом и вырыванию их из трубной доски/2.7.1.стр. 78,79/. В последующем эта система была использована в 1997году при внедрении первого вы-

сокотемпературного воздухоподогревателя и применяется в настоящее время/2.7.1./стр.79/.

Что касается теоретического обоснования целесообразности применения предварительного подогрева воздуха перед подачей в высокотемпературные подогреватели, то это определяется температурами стенок труб рекуператоров при различных соотношениях α_B/α_G и при различных температурах на входе в подогреватели. Расчёты производятся по формуле: $t_B - t_{CT}/t_{CT} - t_B = \alpha_B/\alpha_G$.

При соотношении $\alpha_B/\alpha_G=2$, что может иметь место только при локальных (местных) условиях в зонах подачи воздуха в высокотемпературный воздухоподогреватель температура стенок труб в локальной зоне составит при температуре воздуха 20^0C . и температуре газов перед подогревателем 950^0C .: $950 - t_{CT}/t_{CT} - 20 = 2,0$ $950 - t_{CT} = -2t_{CT} - 40$ $990 = 3t_{CT}$ $t_{CT} = 330$. При подогреве воздуха до 300^0 температура стенок труб составит 516^0C . При соотношении $\alpha_B/\alpha_G=1,0$ температура стенок труб при температуре воздуха 20^0C . составит 485^0C ., а при температуре воздуха 300^0C . – 625^0C . Понятно, что при температуре стенок труб 625^0C . отложение техуглерода на них не может происходить. Впрочем, и без теоретических выкладок понятно, что при повышении температуры воздуха, подаваемого в рекуператор, температура стенок труб неизбежно повысится.

Особые сложности возникают с каркасным техуглеродом серий 500 и 600, склонность к отложениям которых на внут-

ренных поверхностях труб подогревателей значительно выше, чем у протекторных марок техуглерода серий 100, 200 и 300. Причины этого могут быть связаны как с наличием на поверхности техуглерода серий 500 и 600 полиароматических углеводородов (ПАУ), так и склонностью частиц техуглерода этих серий к коагуляции и адгезии к металлу. В подогревателях фирмы ALSTOM, применяемых для этих серий техуглерода обязательно используется систематическая паровая продувка (одновременно продувается 10% трубок струями пара со сверхзвуковой скоростью под давлением 10бар, тогда как в подогревателях, используемых для подогрева воздуха при получении техуглерода протекторных марок, продувка труб производится периодически. При применении воздухоподогревателей ПВ185, а также их новых модификаций (ПВ-185М, ПВ-180), имеющих небольшой наружный диаметр труб (42–48мм), для уменьшения отложений в трубах подогревателей техуглерода серий 500 и 600 нужно использовать те же способы, что и для протекторных марок техуглерода, то есть предварительный подогрев воздуха и равномерное распределением воздуха, подаваемого в воздухоподогреватель. В зимний период температура воздуха, поступающего в технологические цеха ОЗТУ, может иметь отрицательные значения (-8°C . рис2.9.), поэтому в производстве каркасных марок техуглерода большое значение имеют газоохладители, в которых производится первая стадия подогрева воздуха. Первоначально газоохладите-

ли, разработанные специалистами ВНИИТУ, предназначались для естественного охлаждения углеродогоазовой смеси за счёт передачи тепла от углеродогоазовой смеси атмосферному воздуху через металлические стенки аппарата для понижения температуры и уменьшения влагосодержания углеродогоазовой смеси перед подачей её в фильтры улавливания. Для повышения эффективности газоохладителей Ярославский завод техуглерода посредством установки дополнительных рубашек организовал принудительную подачу воздуха в эти аппараты для нагрева его и подачи как в подогреватели ПВ-53, так и камеры обогрева сушильных барабанов/2.7..2/стр223-224. На Омском ЗТУ воздушные рубашки на газоохладители были установлены несколько позднее и только в производстве каркасных марок техуглерода. Рубашки газоохладителей были обвязаны последовательно, то есть вся поверхность газоохладителя использовалась для нагрева воздуха, поступающего в подогреватель предварительного подогрева воздуха ПВ-74. Однако ожидаемого результата получить не удалось. Сначала температура воздуха составляла 103–110⁰С., но затем постепенно снижалась, что указывало на отложения техуглерода на поверхности газоохладителя. Особенно это сильно проявлялось в холодное время года. При понижении температуры воздуха на выходе из газоохладителя ниже 80⁰С. начиналось забивание труб в подогревателе ПВ-74, а затем и в подогревателе ПВ-185. Отсюда понятно, что в производстве каркасных марок техуглерода

прежде всего нужно принимать меры для повышения температуры нагрева воздуха в рубашках газоохладителей для того, чтобы обеспечить конечную температуру подогрева воздуха в пределах 630–650⁰С. Следует отметить, что газоохладители используются на ОЗТУ с 1997-го года и при их полной замене необходимо изменить конструкцию газоохладителей для обеспечения нагрева воздуха до 150–200⁰С. Такие конструкции в настоящее время известны.

2.6. Заключение.

2.6.1. Воздухоподогреватели с внутренним диаметром труб 33–50мм, вопреки сложившемуся мнению зарубежных специалистов, могут использоваться для высокотемпературного нагрева воздуха, подаваемого в реакторы для получения технического углерода, что подтверждается многолетней практикой использования таких подогревателей на Омском заводе технического углерода. Обязательным условием при этом является предварительный подогрев воздуха до 150 – 250⁰С. перед подачей его в высокотемпературный воздухоподогреватель. (рис.2.2; рис.2.3.; рис.2.4.). Это необходимо для предотвращения отложений техуглерода на внутренних поверхностях труб подогревателей. Необходимо отметить также, что чем меньше диаметр труб, используемых в воздухоподогревателях, тем выше их эффективность. Масса таких подогревателей при одинаковой температуре подогрева воздуха значительно меньше массы подогревателей, в которых применяются трубы большого диаметра(>80мм).

2.6.2. Приобретение воздухоподогревателей фирмы Alstom в настоящее время нецелесообразно, так как срок окупаемости такого подогревателя значительно превысит срок его службы (разд.2.1.1.). Следует отметить также, что температура подогрева воздуха при получении протекторных марок техуглерода в таком подогревателе обычно составляет 800°C ., что достигается при двухстадийной системе подогрева воздуха Омского ЗТУ.

Следует отметить, что температура подогрева воздуха в отечественной металлургической промышленности, где в основном и применяются металлические рекуператоры, не превышала в тот период времени 500°C ., не смотря на наличие специализированных организаций по проектированию и изготовлению воздухоподогревателей. /2.7.7./ стр. 544.

2.6.3. В производстве протекторных марок техуглерода целесообразно организовать первичный подогрев воздуха в рубашках газоохладителей до $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$., что позволит повысить конечную температуру подогрева воздуха, подаваемого в реакторы. Отложения техуглерода протекторных марок на внутренних поверхностях газоохладителей маловероятны. **Воздух, нагретый в газоохладителе до $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$., сначала нужно подать в прямоточную секцию ВПВ–235, затем в подогреватель ПВ–74(92), и далее в противоточную секцию ВПВ–235.** При такой схеме подачи воздуха и подъёме температуры углеродогоазовой смеси перед ВПВ–235 до $980\text{--}1000^{\circ}\text{C}$. температура воздуха, посту-

пающего в реактор должна увеличиться до 830–860⁰С.

2.6.4. Подогреватели предварительного подогрева воздуха (ПВ74, ПВ92) нужно заменить на подогреватели с большими диаметрами труб, тем более, что трубы 89х4 имеют даже несколько меньший вес, чем применяемые в подогревателях ПВ–74 и ПВ–92 трубы 76х5. Подогреватели ПВ74 эксплуатируются 15 лет, а после демонтажа могут использоваться для подогрева воздуха, подаваемого в камеры обогрева сушильных барабанов.

2.6.5. Наиболее сложной проблемой является использование подогревателей с малым диаметром труб для подогрева воздуха, подаваемого в реакторы для получения техуглерода каркасных марок (серий 500 и 600) в связи с высокой склонностью этих марок техуглерода к налипанию на поверхность металлических труб. Поэтому, прежде всего нужно значительно уменьшить отложения техуглерода в трубах подогревателей ПВ74 и ПВ185. Одной из мер может быть подача воздуха в подогреватель ПВ74 прямотоком, как это показано на рис.2.2. По этой схеме воздух подаётся в зону, где газы имеют более высокую температуру, что снижает вероятность забивания труб в зоне подачи холодного воздуха. Сразу можно отметить, что воздух следует подать как минимум через два патрубка, как это указано в разделе 2.5. С учётом опыта эксплуатации этой схемы целесообразно на первой стадии подогрева воздуха предусмотреть установку подогревателя ПВ–92 и обвязать его по прямоточной схеме. При этом тем-

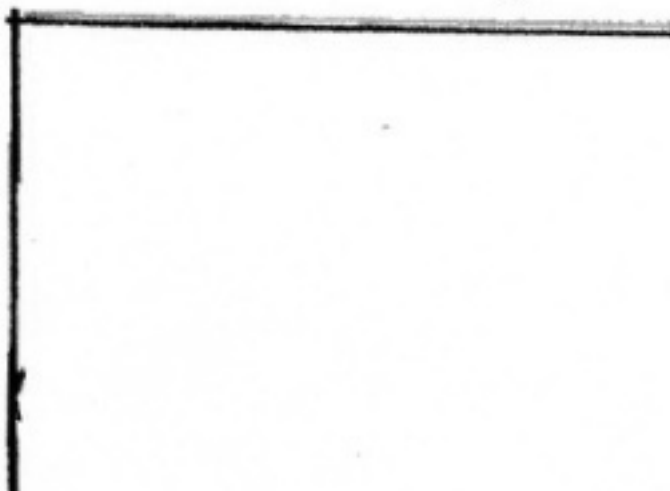
температура воздуха на входе в ПВ–92 (на выходе из газоохладителя) должна составлять не менее 120°C . На второй стадии подогрева установить подогреватель заводской конструкции ПВ–220, обеспечивающий нагрев воздуха до 700°C . (рис.2.8, 2.9). При необходимости обеспечения нагрева воздуха до $750 - 780^{\circ}\text{C}$. нужно на второй стадии установить подогреватель типа ПВ–185 с учётом усовершенствований, применённых при разработке подогревателя ВПВ–235. Воздухоподогреватель нужно изготавливать из жаропрочных сталей 20Х25Н20С2 или 20Х23Н18. Необходимо также устранить переток воздуха из прямоточной секции в противоточную, как это сделано на подогревателе ВПВ–235.

Схема

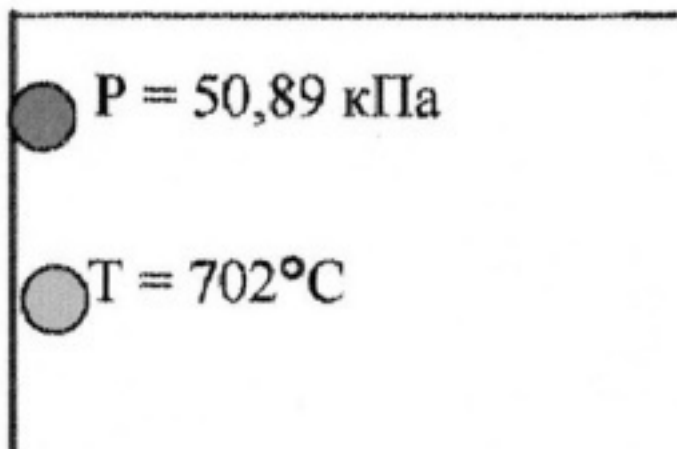
прилагается

(рис.2.8.).

$t =$



Подогреватель ПВ–220(215) может быть изготовлен из воздухоподогревателя ВПВ–250 с разрушенной нижней решёткой. Подобный подогреватель, изготовленный из воздухоподогревателя ВПВ–270, применялся на ОЗТУ и обеспечивал нагрев воздуха до 700°C . (рис.2.9).



$P = 50,89 \text{ кПа}$

$T = 702^{\circ}\text{C}$

Как понятно из приведённых рисунков подогреватели ПВ–230 и ПВ–220 не имеют двойного дна, поэтому температура перед подогревателями поддерживается в пределах 840–860⁰С., а конечная температура подогрева воздуха составляет 690–710⁰С. По данным зарубежных специалистов двойное дно нужно применять только при температуре подогрева воздуха более 750⁰С./2.7.3./ Расчётная температура стенок труб

подогревателей ПВ220 (ПВ230) составит 450⁰С. в верхней части подогревателей и 775⁰С. в нижней части подогревателей. При такой температуре стенок не должно быть отложений техуглерода на стенках труб подогревателей и не должно быть опасности разрушения нижней трубной доски, так как допустимая температура применения стали, из которой изготовлены трубные решётки и трубы подогревателя(ст.20Х23Н18) составляет 1100⁰С. Необходимо отметить, что, как видно на рис.2.9., температура воздуха, поступающего в зимнее время года в подогреватель ПВ–74 может иметь отрицательные значения (-8⁰С.). Поэтому подогрев воздуха в газоохладителе необходим.

2.6.6. Газоохладители необходимо заменить или усовершенствовать для обеспечения температуры подогрева воздуха не ниже 150⁰С.

2.6.7. Особое значение для сохранения целостности воздухоподогревателей имеет порядок пуска и остановки ре-

акторов. По зарубежным рекомендациям необходимо при пусках и остановках реакторов соблюдать скорость подъёма или снижения температуры перед подогревателем в пределах 50–55⁰С./час. Такие рекомендации даны для подогревателя фирмы «ALSTOM», хотя каждая труба его имеет индивидуальный компенсатор. Тем более, такие же скорости подъёма и снижения температуры нужно соблюдать и для уголковых воздухоподогревателей. При этом температура газов перед подогревателями предварительного подогрева (ПВ74, ПВ92, ПВ125) будет изменяться равномерно в соответствии с изменениями температуры газов перед высокотемпературными воздухоподогревателями (ВПВ235, ВПВ250), что позволит избежать их разрушения в периоды пуска и остановки реакторов.

2.7. Перечень использованной литературы.

2.7.1. В.И. Ивановский Технический углерод. Процессы и аппараты. Омск. 2004.

2.7.2. В.Ю. Орлов. А.М. Комаров. Л.А. Ляпина. Производство и использование технического углерода для резин. Ярославль. 2002.

2.7.3. Регенерация тепловой энергии. Технические достижения в области высокотемпературных теплообменников. Материалы 11-ой международной конференции по техническому углероду. Рим. Ноябрь 2010.

2.7.4. Б.П.Тебенков. Рекуператоры для промышленных

печей. Металлургия, М., 1965.

2.7.5. И.М. Лемлех., В.А. Гордин. Высокотемпературный нагрев воздуха в чёрной металлургии. Металлургиздат. М., 1963.

2.7.6. Изделия SCHACK для промышленности технического углерода. 2012.

2.7.7. Лисиенко Р.Г. Хрестоматия энергосбережения «Теплоэнергетик», Москва, 2003. Книга 2, стр. 544.

2.8. Приложения.

2.8.1. Тепловой расчёт воздухоподогревателей (рекуператоров).

При проектировании воздухоподогревателей сначала определяют коэффициенты теплоотдачи по воздуху и газу, а затем рассчитывают коэффициент теплопередачи рекуператора по следующей формуле:

$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{1}{\alpha_g}}$, где K – коэффициент теплопередачи рекуператора, а α_v и α_g коэффициенты теплоотдачи по воздуху и газу.

В связи с тем, что на заводах техуглерода производятся периодические обследования работы воздухоподогревателей и систем подогрева воздуха/2.7.1.стр.82/, определение коэффициентов теплоотдачи по газу и воздуху для расчёта коэффициента теплопередачи не требуется. Коэффициенты теплопередачи воздухоподогревателей рассчитываются по измеренным данным. Фактический коэффициент теплопередачи K , Вт/м²град определяется из основного уравнения

для расчёта рекуператоров: $Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}$. Отсюда $K =$, где K —коэффициент теплопередачи рекуператора, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ или $(\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град})$;

Q – количество тепла, переданное в рекуператоре воздуху от углеродогазовой смеси, Вт .

Δt_{cp} – средний температурный напор (средняя логарифмическая разность температур) определяется по формуле: $\Delta t_{cp} = \Delta t_b - \Delta t_m / 2.3 \lg \Delta t_b / \Delta t_m$ $^{\circ}\text{C}$.;

F – поверхность нагрева рекуператора, м^2 .

Количество тепла, необходимого для нагрева воздуха определяется по формуле:

$Q = V_b \cdot C_b \cdot \Delta t$, Вт ., где

V – объём воздуха, $\text{нм}^3/\text{час}$.;

C_b – объёмная теплоёмкость воздуха, $\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot \text{град}$.;

Δt – разность температур воздуха на входе в рекуператор и на выходе из него (температура воздуха до и после рекуператора). Не путать Δt и Δt_{cp} .

Для определения коэффициентов теплопередачи действующих воздухоподогревателей (рекуператоров) достаточно данных, полученных при обследовании систем подогрева воздуха/7.2.1.стр.82/. Поверхность нагрева подогревателей известна, объём воздуха $\text{нм}^3/\text{час}$ измеряется постоянно, средняя логарифмическая разность температур Δt_{cp} легко определяется, в том числе с использованием номограммы, приведённой в этом приложении; средняя теплоёмкость воздуха определяется по таблицам; разность температур возду-

ха до и после нагрева в рекуператоре Δt определяется по результатам обследования.

Пример.

Рассчитать коэффициенты теплопередачи в подогревателях ПВ–74 и ПВ–230 по фактическим данным (рис. 2.9.).

Подогреватель ПВ– 74. Исходные данные.

– Температура воздуха на входе в подогреватель ПВ–74 – (-8).

– Температура воздуха на выходе из подогревателя ПВ–74 – 235⁰С.

– Расход воздуха составляет 8750м³/час при 20⁰С.

– Поверхность нагрева воздухоподогревателя – 74м².

– Объёмная теплоёмкость воздуха – 1,31кдж/м²·град.

Количество тепла, использованного для нагрева воздуха:

$$Q = V \cdot C_v \cdot \Delta t = 8750 \cdot 1,31 \cdot [235 - (-8)] / 3,6 = 773719 \text{ Вт.}$$

Средняя логарифмическая разность температур Δt_{cp} составит:

$$235^0\text{С. } -8^0\text{С.}$$

$$634^0\text{С. } 541^0\text{С.}$$

$$\Delta t_m = 399^0\text{С. } \Delta t_6 = 549^0\text{С.}$$

Так как $\Delta t_6 / \Delta t_m < 2,0$ средняя разность температур определяется как среднее арифметическое, то есть: $\Delta t_{cp} = (549 + 399) / 2 = 474^0\text{С.}$ (В том случае, если большая разность температур не превышает меньшую разность температур более чем в 2 раза, то Δt_{cp} определяется как среднее арифме-

тическое).

Определим коэффициент теплопередачи подогревателя ПВ–74:

$$K = 773719 \text{ Вт} / (474 \text{ }^{\circ}\text{С} \cdot 74 \text{ м}^2) = 22,1 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{град}.$$

Невысокое значение коэффициента теплопередачи связано с низкими расходами воздуха и газов, а следовательно и с низкими скоростями этих агентов и низкими коэффициентами теплоотдачи по газу и воздуху, от которых напрямую зависит коэффициент теплопередачи: $K = \alpha_{\text{в}} \cdot \alpha_{\text{г}} / \alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{г}}$.

Рассчитаем коэффициент теплопередачи подогревателя ПВ230 (рис.2.9.).

Исходные данные: $Q_{\text{в}} = 8750 \text{ м}^3 / \text{час}$; $t_{\text{вн.}} = 235^{\circ}\text{С}$. $t_{\text{вк}} = 702^{\circ}$; $t_{\text{гн}} = 845^{\circ}\text{С}$. $t_{\text{гк}} = 634^{\circ}\text{С}$. $F = 230 \text{ м}^2$; $C_{\text{в.}} = 1,34 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{град})$.

Определим среднюю логарифмическую разность температур:

$$702^{\circ}\text{С}. 235^{\circ}\text{С}.$$

$$845^{\circ}\text{С}. 634^{\circ}\text{С}.$$

$$\Delta t_{\text{м}} = 143^{\circ}\text{С}. \Delta t_{\text{б}} = 399^{\circ}\text{С}.$$

$\Delta t_{\text{ср}} = 220^{\circ}\text{С}$. Определение средней логарифмической разности температур произведено по номограмме 2.8.2., имеющейся в приложении.

Определим коэффициент теплопередачи ПВ–230:

$$Q = 8750 \cdot 1,34 \cdot (702 - 235) / 3,6 = 1520993 \text{ Вт}.$$

$$K = 1520993 / 230 \cdot 220 = 30,1 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{град}.$$

В рассмотренном примере определены коэффициенты теплопередачи для подогревателей системы обогрева, подаваемой для нагрева воздуха до 700°C . в производстве техуглерода серий 500 и 600.

При расчёте коэффициентов теплопередачи для подогревателей наиболее распространённой системы подогрева воздуха, подаваемого в реакторы для получения протекторных марок техуглерода (рис.2.3.), получены следующие результаты:

– общий коэффициент теплопередачи всей системы подогрева

$$K_{\text{общ}}=35,47\text{вт/м}^2\cdot\text{град};$$

– Коэффициент теплопередачи подогревателя ПВ–74 составляет

$$K_1=32,33\text{вт/м}^2\cdot\text{град};$$

– коэффициент теплопередачи противоточной секции ВПВ–235 составляет

$$K_2=43,8\text{вт/м}^2\cdot\text{град};$$

– коэффициент теплопередачи прямоточной секции ВПВ–235 составляет

$$K_3= 59,2\text{вт/м}^2\cdot\text{град}.$$

Количество тепла, поступающее от различных элементов системы подогрева для нагрева воздуха, подаваемого в реакторы (рис.2.3.):

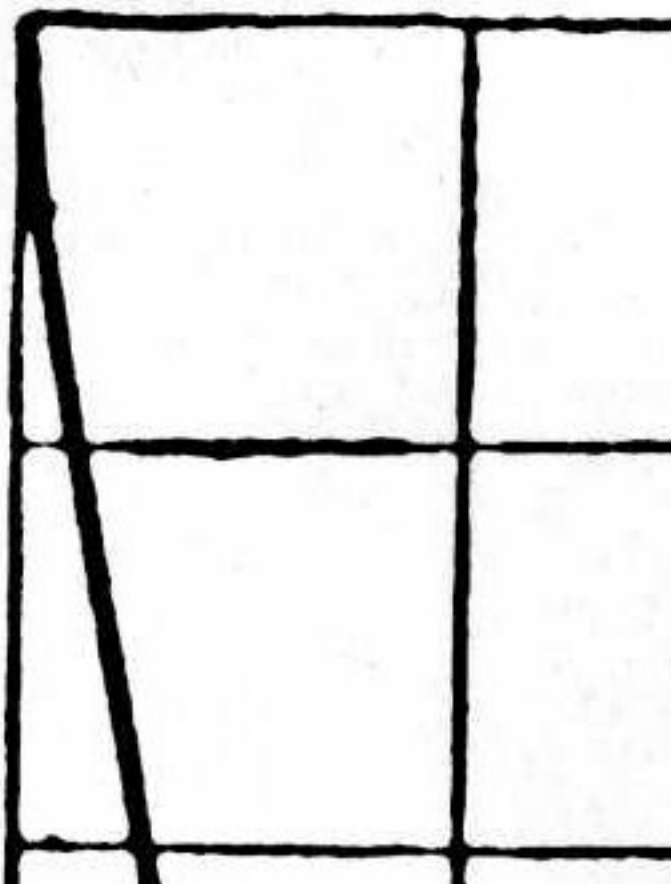
– подогреватель предварительного подогрева воздуха ПВ–74 ($F=74\text{м}^2$)– 29.5%;

- противоточная секция ВПВ235 ($F=219,8\text{м}^2$) – 54,9%;
- прямоточная секция ВПВ–235 ($F=15,2\text{м}^2$) – 15,6%.

Отсюда видно, что подогреватель ПВ–74, изготовленный из обычной коррозионностойкой стали обеспечивает почти 30% тепла в высокотемпературном процессе нагрева воздуха.

2.8.2. Номограмма для определения

Atom.



2.8.3. График и номограмма для определения коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = 1,163 \cdot A$$

$$\cdot (w_{\text{в}}/d)^{0,8} / d$$

Значение
Численное
вспомогатель
Для расш
приведенной
равенство

(ω)

3 Использование химического тепла отходящих газов производства техуглерода.

3.1. Введение.

В предыдущем разделе было рассмотрено использование физического тепла газов, образующихся в реакторе для получения техуглерода, при этом в этом разделе было рассмотрено только использование тепла газов, выходящих из реактора, для нагрева технологического воздуха. Это связано, прежде всего, с тем, что из всех технологических агентов, подаваемых в реактор, масса воздуха составляет наибольшую величину, что позволяет вернуть в процесс значительную часть тепла газов, выходящих из реактора. Используется физическое тепло отходящих газов, образующихся при получении техуглерода, также для получения пара и подогрева сырья /3.7.2. /стр. 72—89. Имеются сведения и о применении различных типов оборудования для использования тепла отходящих газов, образующихся при производстве техуглерода. Такое оборудование широко используется на ряде заводов ведущих зарубежных фирм по производству техуглерода. Однако внедрять такое оборудование на действующих производствах нужно только после тщательного анализа. Так, установку закалочного котла можно производить только при гарантии полного использовании полученного пара. Кроме того, монтаж такого котла возможен только при полной реконструкции реакторного отделения уста-

новки. Целесообразность установки котла после подогревателя сырья тоже связана с возможностью стабильного использования выработанного пара, хотя такой котёл совместим с действующим оборудованием некоторых технологических потоков, например, потоков цеха №3 ОЗТУ. Таким образом, на действующих технологических потоках гарантированно можно использовать физическое тепло отходящих газов производства техуглерода только для подогрева воздуха и сырья. На действующих заводах техуглерода увеличение объёмов выпуска пара лучше производить за счёт реконструкции действующих котлов, работающих на отходящих газах производства техуглерода, и строительства дополнительных котлов такого же типа. Такие котлы работают надёжнее, чем оборудование технологических потоков, кроме того они имеют резервное топливо, что позволяет стабильно обеспечивать паром заводские подразделения.

3.2. Использование отходящих газов, образующихся при производстве техуглерода.

Отходящие газы производства техуглерода относятся к низкокалорийным газам, которые используются в качестве топлива в тепловых и энергетических установках, причём из всех низкокалорийных газов, применяемых в промышленности, они имеют самую низкую теплоту сгорания. Так, доменный газ, который является побочным продуктом при выплавке чугуна в доменных печах, имеет среднее значение

теплоты сгорания $4,1 \text{ МДж/м}^3$, смешанный генераторный газ – $5,15 \text{ МДж/м}^3/3.7.1./$. Отходящие газы производства техуглерода имеют теплоту сгорания (теплотворную способность по прежней терминологии) в пределах $2,085\text{—}2,6 \text{ МДж/м}^3$. Тем не менее это горючий газ, который, не смотря на низкую теплоту сгорания, широко используется в энергетических установках для получения пара. Кроме того, продукты сгорания отходящих газов применяются в качестве теплоносителя для сушки гранулированного техуглерода.

3.2.1. Сжигание отходящих газов в энергетических установках.

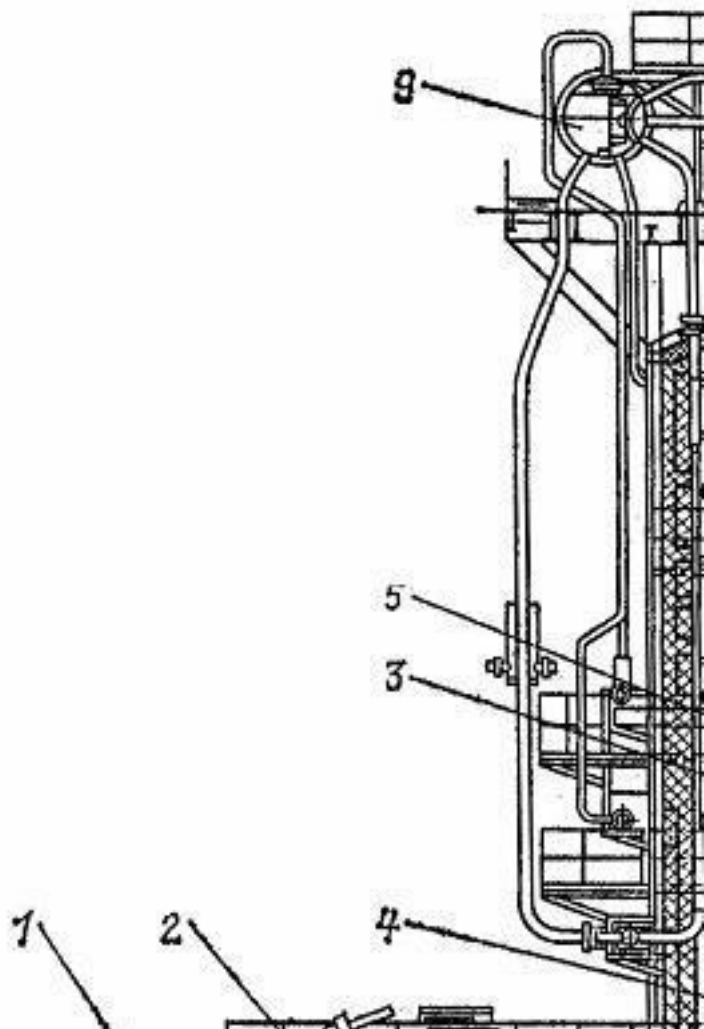
Сжигание отходящих газов производства техуглерода в паровых котлах имеет давнюю историю. Дожиг газов в котлах ДКВР 10/13 (производительность 10 т/час и давление пара 13 кг/см^2) на Омском ЗТУ производился ещё в 50-х годах прошлого века. Стандартные котлы были оборудованы специальными предтопками и горелками, предназначенными для сжигания низкокалорийных газов. Основные работы проводил Московский энергетический институт (ЭНИН). К проекту привлекались «Теплопроект» и ЦКТИ (Центральный котлотурбинный институт). В 60-е годы в связи с быстрым развитием отрасли техуглерода по заданию Министерства нефтехимической промышленности на Белгородском котельном заводе начали изготавливать специальные котлы для использования в них в качестве топлива отходящих газов производства техуглерода (СК–29/24; ПКК–

30/24; ПКК–75/24). Первая цифра в маркировке котла указывает на его производительность в тоннах/час, вторая на конечное давление пара в атм. Этими котлами стали обеспечиваться все заводы техуглерода при их строительстве и реконструкции. Однако не все котлы оказались равноценными. Если котёл ПКК–30 был надёжен в эксплуатации и обеспечивал проектные характеристики, то на котле ПКК–75 длительное время проектная производительность не была достигнута, надёжность котла была не высокой. Котлы же ПКК–30 были модернизированы сначала на Ярославском заводе техуглерода, а в настоящее время и на Омском, в результате чего производительность их увеличилась до 40–42 тонн/час. (на 30–40%). Что касается подачи природного газа в горелки котлов для стабилизации горения отходящих газов, то в горелки котлов ПКК–30 Ярославского ЗТУ подаётся примерно $30\text{нм}^3/\text{час}$ природного газа, что по количеству вносимого тепла составляет не более 2% от количества тепла, вносимого в котёл за счёт сжигания отходящих газов. Для стабилизации горения отходящих газов, сжигаемых в котлах ПКК-75, требуется подавать не менее $300\text{нм}^3/\text{час}$ природного газа, что составляет > 8% от тепла, вносимого в топку котла отходящими газами.

Выработка пара за счёт сжигания отходящих газов производства техуглерода в специальных котлах позволяет решить и другую важную задачу для заводов техуглерода—нейтрализацию вредных для человека газов, входящих в состав от-

ходящих газов, образующихся при производстве техуглерода. К таким газам относится, прежде всего, окись углерода (CO), а также сероводород (H₂S). На рис 3.1. показан специальный котёл, в котором в качестве топлива используются отходящие газы производства техуглерода.

Рис 3.1.



тёл ПКК включает: 1—горелка; 2—предтопок; 3—испарительная поверхность (ширмы); 4—подъёмный газоход; 5—пароперегреватель; 6—воздухоподогреватель; 7—экономайзер; 8—выпускной газоход; 9—барабан.

Отходящие газы через горелку 1 поступают в предтопок котла 2, где присходит их сжигание. Для обеспечения сжигания отходящих газов в горелку подаётся нагретый воздух и небольшое количество природного газа для стабилизации горения и обеспечения заданной температуры продуктов сгорания газов. Из предтопка продукты сгорания по газоходу 4 проходят испарительные секции 3 (ширмы), пароперегреватель 5, а затем по выпускному газоходу 8 проходят воздухоподогреватель 6 и экономайзер 7. Все элементы котла состоят из системы труб, нагреваемых омывающими их продуктами сгорания. В трубах испарительных секций (ширмах) происходит кипение воды и образование пара, который затем поступает в барабан 9. В пароперегревателе 5 пар, поступающий из барабана, перегревается до температуры выше температуры насыщения (обычно до 370°C). В воздухоподогревателе 6 нагревается воздух перед подачей в горелку. В экономайзере 7 нагревается питательная вода, поступающая в котёл.

Желательно, чтобы мощности котлов по объёмам дожигаемых газов в $\text{нм}^3/\text{час}$ соответствовала часовому количеству образующихся отходящих газов на заводе. Однако фактически на большинстве отечественных заводов техуглерода весь

объём отходящих газов в котлах дожечь не удаётся, так как количества имеющихся котлов для этого недостаточно. Такое положение сложилось по разным причинам. Так, на Омском заводе техуглерода при строительстве цеха по производству каркасных марок техуглерода вместо четырёх котлов, предусмотренных проектом, по решению Министерства было построено только два котла. Сжигание отходящих газов с двух других потоков было предусмотрено в печи дожига газов. Такие печи были построены на всех заводах техуглерода в связи с отсутствием возможности полного сжигания отходящих газов в котлах. В среднем на российских заводах техуглерода примерно 30% отходящих газов сжигаются в печах дожига. Понятно, что сжигание отходящих газов производства техуглерода в специальных печах с целью их утилизации (обезвреживания) неэкономично, однако это необходимо производить для соблюдения природоохранных норм. Следует отметить, что на зарубежных заводах техуглерода по данным, сообщаемым на ежегодно проводимых международных конференциях по техуглероду (Carbon Black World), полезно используется только 20% химического тепла отходящих газов. Этот объём полезно сжигаемого отходящего газа длительное время подтверждается на всех конференциях по техуглероду. Возможно, что не учитываются результаты, достигнутые Китайской промышленностью технического углерода, но в любом случае понятно, что в отечественной промышленности техуглерода объём полезно сжигаемых от-

ходящих газов никак не ниже, чем на заводах техуглерода зарубежных фирм.

Пар, вырабатываемый в котельных заводах техуглерода с применением в качестве топлива отходящих газов, используется как для внутренних потребностей заводов, так и поставляется другим предприятиям и организациям, в том числе и для обеспечения теплом и горячей водой жилых массивов. Большим и стабильным источником потребления пара стали электростанции, построенные в 2001–2002 годах на Ярославском и Омском заводах техуглерода, что позволило этим заводам обеспечить себя собственной электроэнергией. Ярославский ЗТУ в последние годы использует паровые турбины в качестве приводов для нагнетателей, подающих воздух в реакторы для производства техуглерода. Таким образом, в настоящее время имеются необходимые условия для более полного использования химического тепла отходящих газов за счёт реконструкции и строительства котлов, использующих в качестве топлива отходящие газы производства техуглерода. Следует отметить также, что отходящие газы производства техуглерода могут использоваться как топливо и в водогрейных котлах, которые эксплуатировались ранее на Ставропольском и Омском заводах.

3.2.2. Утилизация избыточных объёмов отходящих газов производства техуглерода.

Как уже отмечалось, из-за недостатка котлов, предназначенных для сжигания отходящих газов, а так же из-за про-

блем с реализацией пара, на большинстве заводов теухглерода имелся избыток отходящих газов, которые требовалось дожечь для обезвреживания вредных газов, входящих в состав отходящих газов. К таким газам относятся, прежде всего, окись углерода (CO), а также сероводород (H_2S). При сжигании газов окись углерода окисляется до безвредного для человека углекислого газа (CO_2), а сероводород, содержание которого в отходящих газах незначительно, переходит в менее опасный сернистый ангидрид (SO_2). Предельно допустимая концентрация окиси углерода в воздухе на границе санитарно-защитной зоны заводов теухглерода составляет 5мг/нм^3 . Учитывая, что на воздух в местах отбора проб инспектирующими организациями могут оказывать влияние основные загрязнители атмосферы— автотранспорт и котельные ТЭЦ, работающие на угле и мазуте, заводам теухглерода необходимо обеспечить полное сжигание окиси углерода и сероводорода так, чтобы концентрация газов в источниках выбросов была ниже установленных норм. Поэтому в печах дожига газов необходимо обеспечить полное сжигание всех горючих газов, к которым относятся и окись углерода и сероводород. Сжигание отходящих газов в печах дожига сложнее, чем в котлах по ряду причин. В отличии от печей дожига газов в топке котлов подаётся нагретый воздух, что сокращает время на достижение температуры воспламенения газозвоздушной смеси, а следовательно и ускоряет процесс сжигания газа. В печах дожига газов сжигается различное коли-

чество отходящих газов (в зависимости от количества работающих технологических потоков и котлов), что затрудняет их обслуживание. Тем не менее, за счёт хорошего смешения газа с воздухом в горелках, хорошей стабилизации пламени в огнеупорных каналах горелок, а также за счёт большого объёма топочного пространства в печах дожига газов обеспечиваются условия для полного сгорания отходящих газов производства техуглерода. Печи дожига газов имеют, как правило, большую производительность. Одна печь, оборудованная четырьмя стандартными горелками, может обеспечить полную утилизацию отходящих газов с двух технологических потоков.

Используются в промышленности техуглерода и другие способы сжигания отходящих газов. Так, длительное время отходящие газы дожигались на свечах. Свеча состоит из вертикальной трубы диаметром 1200 – 1400мм. и высотой 40—60м. В верхней части трубы установлены специальные горелки для сжигания низкокалорийных газов. На Омском заводе техуглерода подобная свеча использовалась в 60-х годах прошлого столетия для сжигания газов от производства активных марок техуглерода (первого в стране). Свеча была оборудована базальтовыми горелками с электроподжигом, доступ к горелкам осуществлялся по лестничным маршам (этажерке). Отходящие газы сразу же загорались от воздействия электрической дуги и устойчиво горели без отрыва пламени. Необходимо отметить, что отходящие газы с это-

го производства имели теплоту сгорания примерно на 20% выше, чем газы от производств лампового техуглерода, так как содержали меньше влаги из-за применения мокрой системы очистки газов. В дальнейшем отходящие газы от производства активных марок техуглерода использовались в качестве топлива в котлах котельной Омского шинного завода, а в свече дожигался только избыточный газ. Использовалась свеча и для дожига газов от производства каркасных марок техуглерода на Омском ЗТУ при ремонте печи дожига газов. Большое значение имела организация сжигания отходящих газов непосредственно на выхлопных трубах рукавных фильтров. В период внедрения этой разработки (начало 90-х годов) было доказано расчётами и подтверждено результатами анализов, что содержание вредных газов в факеле дожигаемых отходящих газов соответствует нормам, и что таким образом можно полностью дожечь газы, удаляемые из выхлопной трубы технологического потока без нанесения вреда окружающей среде. Однако инспектирующие организации согласовали сжигание газов на выхлопных трубах только при переходных режимах, то есть в периоды пуска и остановки потоков. Необходимо отметить, что сжигание отходящих газов при переходных режимах положительно сказалось на состоянии окружающей среды в санитарно-защитной зоне Омского завода технического углерода.

3.2.3. Условия обеспечения полного сгорания отходящих газов в котлах и печах дожига газов.

В котельных и печах дожига газов необходимо полностью сжечь отходящие газы, а для этого нужно создать условия для полного горения этих газов. Как известно, для протекания реакций горения необходимы: хорошее перемешивание горючих составляющих газа с кислородом воздуха, обеспечивающее их контакт, организация воспламенения смеси и обеспечение условий распространения пламени и устойчивости горения. (*Перед рассмотрением этого материала желательно ознакомиться с разделом 2.2. Основы теории горения газов, изложенные в источнике [3.7.2.]*).

Реакции горения. В отходящих газах производства техуглера содержатся только четыре горючих газа. Приводим реакции (стехиометрические уравнения) горения этих газов:

$$\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}; \quad \text{CO} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}_2; \quad \text{H}_2\text{S} + 1,5\text{O}_2 = \text{SO}_2;$$
$$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}.$$
 Так как горение происходит не в чистом кислороде, а в воздухе, то в обе части формулы добавляется азот, вносимый с воздухом, по соотношению $\text{N}_2 = 79/21\text{O}_2 = 3,76 \text{O}_2$.

Организация воспламенения смеси. Различают два вида воспламенения— самовоспламенение и вынужденное воспламенение (зажигание). При самовоспламенении весь объём горючей газозвушной смеси постепенно доводится до температуры воспламенения, после чего смесь воспламеняется без внешнего теплового воздействия. (температура воспламенения отходящих газов производства техуглера на-

ходится в пределах $600\text{--}750^{\circ}\text{C}$.)

Зажигание отличается от самовоспламенения тем, что смесь доводится до температуры воспламенения не во всём объёме, а только в небольшой части его каким-нибудь высокотемпературным источником (электрической искрой, запальником и т. д.). В результате этого воспламенение передаётся на весь объём смеси путём распространения пламени, происходящего не мгновенно, а постепенно с определённой скоростью, зависящей от ряда факторов. В горелках выхлопных труб зажигание газов производится за счёт электрической искры, а в предтопках котлов и печах дожига газов применяются запальники, даже, если температура в предтопках выше температуры воспламенения отходящих газов ($>750^{\circ}\text{C}$.). Это необходимо делать во избежание воспламенения газов хлопком.

Основным условием, обеспечивающим полное сжигание отходящих газов, является тщательное перемешивание газов с воздухом. Эффективность перемешивания в значительной степени зависит от конструкции горелок, применяемых для сжигания отходящих газов производства техуглерода. В конструкциях горелок для сжигания низкокалорийных отходящих газов производства техуглерода применён метод закручивания струй. Для закручивания струй в горелках используют тангенциальный подвод и применяют лопаточный закручиватель. На заводах техуглерода применяются горелки, как с тангенциальными подводами, так и с лопаточными

завихрителями.

На Рис. 3.2. показан разрез горелки с тангенциальными подводами воздуха и газов.

1915-1916

...

Подача воздуха производится по патрубку 500x950 (М), отходящие газы поступают по патрубку 450x900 (Л). В результате такого направления движения газов и воздуха происходит их интенсивное перемешивание и из горелки выходит подготовленная к сжиганию газозоудушная смесь, которая сразу же воспламеняется в туннеле горелки. Огнеупорный туннель является обязательным элементом горелки с предварительным смешением газов с воздухом. /3.7.2./ стр.41.

На Рис.3.3. показан разрез предтопка котла ПМК–75. Фактически это топка котла. (1– горелка, 2– топка, 3– туннель, 4– огнеупорный столб). Для стабилизации процесса горения отходящих газов помимо горелочного туннеля в топке имеются огнеупорные столбы, раскалённая поверхность которых способствует стабилизации пламени.

1

3



Помимо того, что столбы имеют раскалённую поверхность, наличие их придаёт дополнительную турбулентность сжигаемой газовой смеси, что способствует более полному сгоранию газов.

3.2.4. Сушка гранулированного техуглерода с использованием продуктов сгорания отходящих газов процесса производства техуглерода.

Сушку гранул техуглерода с использованием в качестве теплоносителя продуктов сгорания отходящих газов производства техуглерода начали проводить с конца 60-х годов прошлого столетия на Омском заводе технического углерода одновременно с внедрением процесса гранулирования техуглерода ПМ-50(П514). Сушка гранул техуглерода осуществлялась продуктами сгорания отходящих газов, образующимися при их сжигании в специальной топке. Из топки газы непосредственно подавались в сушильный барабан, расположенный соосно с топкой /3.7.2./ стр.207. Процесс сушки был стабилизирован только после усовершенствования сушильного барабана МАС-1200. /7.3.2./ Стр.203. Применение в качестве топлива отходящих газов объяснялось не только экономическими причинами – отходящие газы при такой схеме сушки были более безопасным топливом по сравнению с жидкими видами топлива, при применении которых происходило загорание техуглерода в барабане (природный газ был подведён к заводу только в 1991-м году). С

этой технологией сушки потоки производства П514 проработали 15 лет без замены сушильных барабанов.

В связи со строительством на Омском заводе техуглерода новых цехов на всех технологических потоках были внедрены новые схемы сушки с использованием сушильных барабанов БСК–40 с камерами наружного обогрева. Проект отделения обработки техуглерода оказался неудачным, что потребовало внесения существенных изменений в процессы грануляции и сушки техуглерода. Эти изменения были разработаны и внедрены специалистами Омского завода технического углерода/3.7.2./ /стр.182; стр.208-209/ и затем внедрены и на других отечественных заводах техуглерода. При разработке и проектировании процесса сжигания газов и их эвакуации из камеры обогрева сушильного барабана также были допущены ошибки. Так, для удаления отработанных газов из камеры обогрева была предусмотрена выхлопная труба диаметром 720мм, что было совершенно недостаточно. В результате в камере обогрева и сушильном барабане создавался подпор, что приводило к выделению газов в зону обслуживания. Ситуацию усугубила ещё и подача воды в бортов топки для снижения температуры топочных газов, хотя в этом не было никакой необходимости. Это ещё больше увеличило объём газов в камере обогрева. И хотя проблема эвакуации газов из камеры обогрева была решена за счёт замены выхлопных труб камер обогрева трубами ДН=1050мм, в связи с пуском участка сжиженного газа было принято реше-

ние о переводе сушильных барабанов на сжиженный газ. Однако это не способствовало улучшению процессов сгорания газов в камерах обогрева сушильных барабанов. Для сжигания сжиженных газов (пропан-бутан) в камере обогрева были использованы только 4 горелки, тогда как при применении природного газа использовалось 13 горелок, за счёт чего обеспечивалось беспламенное горение газов. . Понятно, что при использовании 4-х горелок условия эксплуатации барабанов значительно ухудшились, так как наружные стенки барабанов омывались светящимися факелами с более высокой температурой, чем температура продуктов сгорания природного газа. Это в конечном итоге привело к сокращению сроков службы сушильных барабанов. Кроме того, имелись случаи разрушения камер обогрева при «хлопках» газоздушных смесей в камерах обогрева при утечках сжиженного газа.

С 1991 года на Омском заводе техуглерода началась газификация завода, заключающаяся в замене всех видов топлива на природный газ, который был подведён к заводу. Эта замена коснулась, прежде всего, реакторов и камер обогрева сушильных барабанов. На всех камерах обогрева горелки для сжиженного газа были заменены горелками для сжигания природного газа, было также увеличено количество горелок на каждую сушильную камеру. Одновременно с этим проводилась реконструкция цеха сухой грануляции по переводу потоков цеха на мокрую грануляцию, что потребо-

вало установки дополнительных сушильных барабанов. Реконструкция 1-го потока была завершена в 1992-м году, 4-го потока – в 1994, 2-го в 2003 году и 3-го только в 2012 году. Необходимо отметить, что на третьем потоке было заменено всё оборудование полностью. Проектирование нового потока осуществлялось заводскими службами. Из-за ограниченных сроков, отпущенных на реконструкцию этого потока, на нём не удалось осуществить сушку техуглерода с использованием отходящих газов. Сушку техуглерода отходящими газами удалось восстановить в том же году на потоке №4 Цеха № 1. По сравнению с первоначальным проектом был увеличен диаметр выхлопной трубы камеры обогрева сушильного барабана, ликвидирован подвод воды в боров топки, заменена шамотная футеровка топки, борова, распределительного коллектора и окон в камере обогрева на корундовую для обеспечения возможности сушки техуглерода природным газом при временном отсутствии отходящих газов. Были исключены из схемы и горелки, установленные в камере обогрева сушильного барабана. *Объёмы топки и борова были оставлены без изменения для обеспечения полного сгорания отходящих газов.*

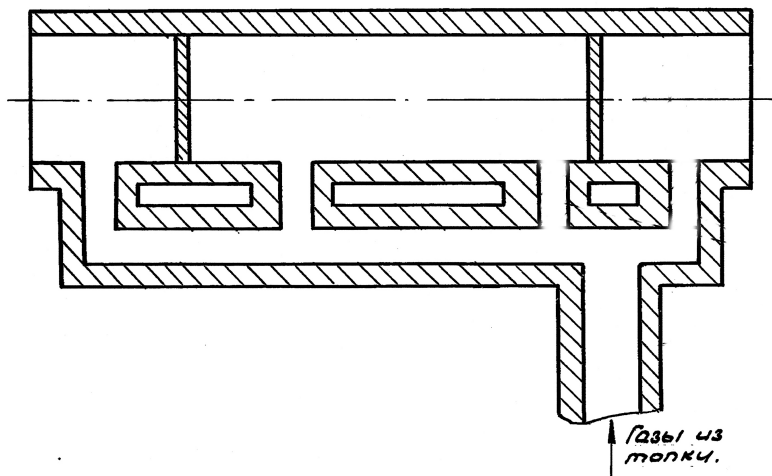
Рис 3.4. Сушка техуглерода с применением отходящих газов производства техуглерода.

1—сушильный барабан БСК-40; 2—камера обогрева барабана; 3—заборный патрубок; 4—топка сушильного барабана; 5—боров топки; 6—Циклон-уплотнитель; 7—циклон доулавливания; 8—фильтр доулавливания; 9—элеватор; 10—турбовоздуходувка отсоса газов из сушильного барабана; 11—выхлопная труба камеры обогрева; 12—дроссель; 13—турбовоздуходувка эвакуации газов из дымовой трубы; 14—воздухоподогреватель; 15—гранулятор; 16—патрубок отсоса газов из сушильного барабана; **I**—трубопровод подачи воздуха в горелку топки; **II**—трубопровод подвода отходящих газов; **III**—подвод природного газа; **IV**—продукты сгорания отходящих газов.

На Рис.3.4. показана схема сушки техуглерода продуктами сгорания отходящих газов, образующихся при производстве техуглерода. Отходящие газы с температурой 190–220⁰С. по трубопроводу **II** подаются в горелку топки сушильного барабана 4, туда же по трубопроводу **I** подаётся воздух, нагретый в воздухоподогревателе 14 до 350–400⁰С. По трубопроводу **III** к горелке подводится природный газ. При обычном режиме сжигания отходящих газов природный газ может подаваться в небольших количествах для стабилизации процесса их горения, а также для повышения температуры газов, поступающих в камеру обогрева сушильного барабана. Используется природный газ также при розжиге горелки и при разогреве топки. В топке происходит полное сгорание отходящих газов, и продукты их сгорания с

температурой 1100–1300⁰С. по бортову 5 поступают в камеру обогрева сушильного барабана. Газы в сушильной камере равномерно распределяются по длине сушильного барабана как это показано на Рис.3.5

Рис. 3.5. Распределение газов в камере обогрева сушильного барабана.



Часть газов из камеры обогрева по заборному патрубку 3 поступает в сушильный барабан (Рис.3.4.) для удаления водяных паров, образующихся при сушке техуглерода, другая часть газов используется для наружного обогрева бара-

бана (передачи тепла от горячих газов влажному техуглероду через стенку барабана). Газы с водяными парами удаляются из полости барабана через патрубок 16 и турбовоздуходувкой 10 направляются в систему доулавливания. Отработанные газы из камеры обогрева с температурой 500–550⁰С. поступают в дымовую трубу 11 и далее, пройдя воздухоподогреватель 14, поступают во всасывающий трубопровод турбовоздуходувки 13. В межтрубное пространство воздухоподогревателя 14 подаётся воздух, который за счёт тепла газов, проходящих по трубам воздухоподогревателя, нагревается до 330–450⁰С. и по трубопроводу I поступает в горелку топки 4. Отработанные газы из воздухоподогревателя 14 с температурой 300⁰С. поступают во всасывающий трубопровод турбовоздуходувки 13 и далее по трубопроводу IV направляются в рубашки обогрева гранулятора, бункеров уплотнителя и циклонов, шлюзовых питателей, течек и т.д. Обогрев поверхностей технологического оборудования производится для предотвращения налипания техуглерода на внутренних поверхностях аппаратов. Избыточная часть газов из дымовой трубы через дроссель 12 сбрасывается в атмосферу.

В связи с тем, что температура газов, омывающих сушильный барабан, значительно ниже, чем при использовании для сушки природного газа и, тем более, сжиженных газов, возрастает срок службы корпусов сушильных барабанов. В этой связи необходимо отметить также и одну из самых распространённых причин уменьшения сроков служ-

бы сушильных барабанов, не связанной непосредственно с видом применяемого для сушки топлива. Такой причиной является остановка барабана без своевременного отключения подачи топлива, что приводит к перегреву металла, из которого изготовлены барабаны, и последующему их разрушению. Это происходило по той причине, что автоматическое отключение подачи топлива в камеру обогрева проектом предусматривалось только при остановке электродвигателя привода барабана. Однако при разрушении муфтовых соединений блокировка не срабатывает, так как в этом случае двигатель продолжает работать и при остановленном барабане, что является одной из основных причин разрушения сушильных барабанов. Такие аварии были устранены после установки на все барабаны датчиков движения, разработанных специалистами Омского

Технического Университета. В этом случае блокировка срабатывает сразу же при прекращении вращения корпуса барабана. Большое значение при эксплуатации барабана имеет контроль температуры стенки барабана, измеряемой специальным пирометром. В период пуска и освоения процесса сушки техуглерода в барабанах с наружным обогревом не удалось обеспечить достоверные показания пирометров для измерения температуры стенки барабана. Обеспечить надёжную работу этих пирометров удалось только в 90-х годах. Выяснилось, что температура стенки барабана при соблюдении регламентных режимов сушки не превыша-

ла 550°C . и подача воды в боров топки не требовалась. Однако к тому времени для сушки техуглерода уже использовался природный газ. Следует отметить, что температура стенки барабана является важным параметром и позволяет временно определить уменьшение или прекращение поступления техуглерода в сушильный барабан и принять необходимые меры. Эта температура должна измеряться в нескольких точках по длине барабана.

3.3. Основные характеристики отходящих газов производства техуглерода.

При сжигании отходящих газов, образующихся при получении техуглерода, необходимо знать и учитывать физические и химические свойства этих газов.

Усреднённый состав сухой части газов:

CO —14—16%; CO_2 —3—4,5%; H_2 —9—13%; O_2 — 1—2%; CH_4 —0,1—0,5%; H_2S —0,05—0,2%; N_2 —72,85—63,35%.

Здесь указан состав сухой части газов, так как газовым анализом определяется состав только сухой части газов и все расчёты процессов горения проводятся, как правило, на сухую составляющую газов. Количество водяных паров определяется расчётным путём и в расчётах обычно относится на сухую часть газов.

Молярная масса M , кг/кмоль— это отношение массы вещества к его количеству. В расчётах её величина может ис-

пользоваться для определения плотности газов.

Плотность ρ_0 , кг/м³ – это масса газа, приходящаяся на 1 м³ занимаемого им объёма. Плотность газовой смеси определяется по формуле:

$$\rho_{см} = 0,01(\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \dots + \rho_n V_n),$$

Где $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ – плотность компонентов газового топлива; V_1, V_2, \dots, V_n – содержание компонентов, % по объёму.

Плотность сухой части отходящих газов производства техуглерода в нормальных условиях определяется по формуле:

$\rho_0 = 0,01(1,25CO + 0,09 H_2 + 1,54 H_2S + 0,717 CH_4 + 1,98 CO_2 + 1,25 N_2 + 1,43 O_2 + 1,98 CO_2)$, где CO, H₂.....,CO₂ – компоненты отходящих газов, % по объёму. /3.1./.

Здесь и в дальнейшем объёмы воздуха и других газов берутся при нормальных физических условиях (P= 101,3кПа и T= 273К).

Горючие составляющие газов: CO; H₂; CH₄; H₂S. (Остальные газы – O₂, CO₂, N₂– это балластные газы).

Влажностью называется содержание в газе водяного пара.

Абсолютной влажностью (влагосодержанием) газа называется количество или масса водяных паров, содержащихся в единице объёма газа. Единица измерения абсолютной

влажности— г/м³.

Объём влажных газов связан с объёмом сухих газов формулой: $V_{в.г.} = V_{с.г.} (1+d/0.805)$, где d — влагосодержание газа, г/м³., 0,805 плотность паров воды, г/м³. Так, например, при влагосодержании газов 302г/м³ объём влажного газа составит: $V_{в.г.} = V_{с.г.} (1+302/0,805) = 1,375V_{с.г.}$

Главной характеристикой отходящих газов, как и любых горючих газов, является их

Теплота сгорания Это количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании единицы количества топлива, в нашем случае 1м³ отходящих газов. Различают высшую и низшую теплоту сгорания. *Высшей теплотой сгорания* топлива $Q_{в}$ называется количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы количества топлива при полной конденсации водяных паров в продуктах сгорания. *Низшей теплотой сгорания* топлива $Q_{н}$ называется количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы количества топлива при отсутствии конденсации водяных паров в продуктах сгорания, образующихся при горении.

Температура уходящих газов, отводимых из теплоиспользующих установок, превышает 100⁰С., следовательно, конденсация водяного пара, содержавшегося в продуктах сгорания, не происходит, поэтому теплотехнические расчёты выполняются на основе низшей теплоты сгорания топлива. Отходящие газы производства техуглерода подаются на сжигание при температурах 170—210⁰С. Низшая теплота сгора-

ния этих газов Q_H составляет 1,9– 2,6 МДж/м³.

Теплоту сгорания сухих отходящих газов производства техуглерода, МДж/м³, с достаточной степенью точности определяют по элементному составу, выраженному в процентах по объёму:

$$Q_H = 0,126CO + 0,108H_2 + 0,238H_2S + 0,358CH_4.$$

Теплота сгорания (теплотворная способность по прежней терминологии) является основной технологической характеристикой топлив, которая используется для их оценки как энергоносителей.

Теплоёмкость газа представляет собой количество теплоты, необходимое для нагрева газа на 1К. Если теплоёмкость отнести к количеству газа, то это будет удельная теплоёмкость. В зависимости от того, что принимается за единицу количества газа, удельная теплоёмкость называется массовой, малярной, объёмной. Для расчётов процессов горения газов используется средняя объёмная теплоёмкость при постоянном давлении, (кДж/м³·К). или (кДж/м³·°С.) Зависимость средней объёмной теплоёмкости продуктов сгорания газов от температуры дана в Табл.3.1.(Приложение 8.1.).

Теплосодержанием газа называется количество теплоты, которым он обладает при данной температуре. $QT = C_m \cdot m \cdot T$, где C_m – удельная массовая теплоёмкость, Дж/(кг·К); m – масса газа, кг; T – температура газа, К.

Теплосодержание продуктов сгорания $Q_{пс} = V_{пс} \cdot C_p \cdot T_g$, где $V_{пс}$ – объём продуктов сгорания; C_p – средневзвешенная

объёмная теплоёмкость продуктов сгорания в диапазоне от 0 до T_g ; T_g – температура горения.

По теплосодержанию компонентов смеси можно определить её температуру (это будет показано на примере).

Теплосодержание единицы массы или объёма при данной температуре называется *энтальпией*.

Пределы воспламенения (взрываемости) в смеси с воздухом в % объёмных находятся в пределах 47 – 81%.

Это означает, что если содержание газов в воздухе составляет менее 47%, то такая смесь не горит и не взрывается из-за недостатка горючих веществ, при содержании газов в воздухе более 81%, такая смесь тоже не горит и не взрывается но уже из-за недостатка окислителя. На практике верхний и нижний пределы взрываемости отходящих газов определяют по содержанию в них кислорода, так как он легко определяется как лабораторным путём, так и с помощью автоматических газоанализаторов. Отходящие газы могут взрываться при содержании в них кислорода от 4 до 11%. Если кислорода в отходящих газах будет содержаться больше 4%, то при наличии источника огня (например, искры горящего техуглерода) в аппарате может произойти взрыв. Поэтому содержание кислорода в отходящих газах постоянно контролируется. Подача отходящих газов на сжигание допускается только при содержании в них кислорода менее 2%. Перед подачей газов в аппараты для сжигания трубопроводы продуваются отходящими газами для вытеснения из них возду-

ха. Производится также и продувка трубопроводов природного газа перед подачей их для сжигания

Температура воспламенения. В разделе **3.2.3.** дано объяснение процесса воспламенения газов и указаны температурные пределы воспламенения отходящих газов производства техуглерода ($600—750^{\circ}\text{C}$.) В Таб.3.2. приведены основные характеристики газов, используемых в промышленности техуглерода, и основных газов, входящих в состав отходящих газов производства техуглерода.

Табл.3.2. приведена в приложении 8.2.

3.4. Температура горения отходящих газов.

Температурой горения называется температура раскалённых продуктов сгорания. Она является одной из основных характеристик газа, а также любого другого топлива.

Источником энергии, идущей на нагрев продуктов сгорания, является теплота сгорания газа и физическая теплота, вносимая газом и окислителем (на 1м^3 газа).

В зависимости от условий сжигания газа в настоящее время различают максимальную (адиабатическую) температуру горения, называемую ещё жаропроизводительностью, а также калориметрическую и теоретическую температуры горения.

Жаропроизводительность $T_{ж}$ – максимальная температура продуктов полного сгорания газа в адиабатических условиях с коэффициентом избытка воздуха 1,0 и при тем-

температуре газа и воздуха, равной 0°C ..

$$T_{ж} = Q_{Н} / (V_{\text{пс}} \cdot c_{\text{р}}). \quad (3.3.),$$

где $Q_{Н}$ – теплота сгорания газа; $V_{\text{пс}}$ – объём продуктов сгорания газа; $c_{\text{р}}$ – средневзвешенная объёмная теплоёмкость продуктов сгорания газа.

$T_{ж}$ – величина, определяемая расчётным методом при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой (т.е. в адиабатных условиях). Эта температура является важной характеристикой топлива. Сравнение различных видов топлива по их способности создавать высокие температуры при горении становится возможным при сравнении величин жаропродуктивности ($T_{ж}$) этих топлив.

Таким образом, жаропродуктивность является второй по значению энергетической характеристикой (после теплоты сгорания), от которой зависит оценка эффективности топлива как энергоносителя.

Жаропродуктивность $^{\circ}\text{C}$, в сухом воздухе некоторых простых газов: водород – 2235, оксид углерода – 2370, метан – 2043, пентан – 2119, ацетилен – 2620.

Жаропродуктивность $^{\circ}\text{C}$, в сухом воздухе некоторых сложных газов усреднённого состава: природный газовых месторождений – 2040, сжиженный (50% C_3H_8 + 50% C_4H_{10}) – 2115, коксовый – 2120, генераторный из тощих углей – 1670, доменный – 1470. Жаропродуктивность отходящих газов производства техуглерода усреднённого состава достигает только величины 1076°C .

Калориметрическая температура горения $T_{\text{кал}}$ — температура, определяемая без учёта диссоциации водяных паров и диоксида углерода, но с учётом фактической начальной температуры газов и воздуха. Она отличается от жаропроизводительности $T_{\text{ж}}$ тем, что температура газа и воздуха, а также коэффициент избытка воздуха (α) принимаются по их действительным значениям. Определить $T_{\text{кал}}$ для газа можно по формуле:

$$T_{\text{кал}} = (Q_{\text{н}} + q_{\text{физ}}) / (\sum V \cdot c_p) \quad (3.4.)$$

Где $q_{\text{физ}}$ — теплосодержание (физическая теплота газа и воздуха, кДж/м³). Или

$$T_{\text{кал}} = (Q_{\text{н}} + 1,0 \cdot c_{\text{сп}} \cdot t_{\text{г}} + \alpha \cdot V_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}) / (\sum V_{\text{п.с.г.}} \cdot c_{\text{сп}} + V_{\text{в.изб.}} \cdot c_{\text{в}}), \text{ где}$$

$V_{\text{в.изб.}} = (\alpha - 1) \cdot V_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}}$. Объём сухих газов в формуле указан равным единице, так как расчёт проводится на 1 м³ сухого газа.

$T_{\text{кал}}$ отходящих газов производства техуглерода будет отличаться от величины жаропроизводительности в связи с учётом тепла отходящих газов производства, поступающих в топку с температурой 170–210⁰С., тепла нагретого до 300–450⁰С. воздуха и учётом коэффициента избытка воздуха.

Теоретическая температура горения определяется также в условиях адиабатического сжигания газов, т.е. при отсутствии теплообмена с окружающей средой, но с учётом теплосодержания свежей горючей смеси, реакций диссоциации молекул CO₂ и H₂O и потерь тепла от физической и

химической неполноты сгорания.

Следует сразу же отметить, что отходящие газы производства техуглерода сжигаются при температурах гораздо ниже 1600°C ., поэтому диссоциация молекул CO_2 и H_2O не происходит, а потери тепла от физической и химической неполноты сгорания не значительны и в расчётах обычно не учитываются. Поэтому при расчёте действительной температуры продуктов сгорания за основу принимается калориметрическая температура.

. Действительная температура продуктов сгорания
Тд – температура, которая достигается в реальных условиях сжигания газов. Она всегда ниже теоретической, так как зависит от потерь тепла в окружающую среду. Потери тепла в окружающую среду для топки и борова сушильной камеры определяют исходя из поверхности и температуры корпусов борова и топки. Обычно эти потери тепла не превышают 5%. В металлургии действительная температура продуктов сгорания определяется исходя из величины калориметрической температуры и значения пирометрического коэффициента η по формуле:

$\text{ТДЕЙСТВ}} = \eta \cdot \text{Ткал}$ (3.5.) , где η – пирометрический коэффициент. Этот коэффициент по данным/3.7.1./ стр. 78. составляет, например, для топочной камеры – 0,95, для топки экранированного котла– 0,65 – 0,7.

Примечание. В последние годы в теплотехнике проведены изменения в терминологии температур горения топлива. Ес-

ли ранее максимальная температура продуктов полного сгорания топлива в адиабатических условиях с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,0$ и при температуре газа и воздуха равной 0°C . обозначалась как калориметрическая температура (термин Д. И. Менделеева термин жаропроизводительность рассматривался как синоним калориметрической температуры), то сейчас эта температура обозначается термином жаропроизводительность, а калориметрическая температура определяется с учётом тепла газов и воздуха и учётом избытка воздуха, как это указано выше.

Из этого следует, что в таблице 2.2. источника /3.7.2./ стр. 30 значения калориметрической температуры полностью соответствуют значениям определяемой в настоящее время по формуле 3.3. жаропроизводительности.

3.4. Расчёты процессов горения отходящих газов.

1. Пример расчёта процесса сжигания отходящих газов в топке сушильного барабана. **1.1. Исходные данные:**

– Состав сухих отходящих газов:

CO_2 – 3,0%; CO – 14%; H_2 – 12%; O_2 – 1,0%; H_2S – 0,2%;
 CH_4 – 0,1%; N_2 – 69,7%.

– Влагосодержание отходящих газов $d_g = 302\text{г}/\text{м}^3$.

– Содержание влаги в воздухе $d_v = 15\text{г}/\text{м}^3$.

– Потери тепла в топке камеры обогрева– 5,0%.

– Температура отходящих газов– 170°C .

– Температура воздуха– 340°C .

– коэффициент избытка воздуха $\alpha=1,1$.

1.2.Расчёт.

1.2.1 Плотность сухих отходящих газов определяется по формуле 3.1.

$$P_0 = 0,01(1,25 \text{ CO} + 0,09 \text{ H}_2 + 1,54 \text{ H}_2\text{S} + 0,717 \text{ CH}_4 + 1,43 \times \text{O}_2 + 1,25 \times 69,7 + 1,98 \text{ CO}_2),$$

где CO, H₂,... CO₂– компоненты отходящих газов, % по объёму.

$$P_0 = 0,01(1,25 \times 14 + 0,09 \times 12 + 1,54 \times 0,2 + 0,717 \times 0,1 + 1,43 \times 1,0 + 1,25 \times 69,7 + 1,98 \times 3,0) = \mathbf{1,12 \text{ кг/м}^3}.$$

1.2.2. Теплота сгорания сухих отходящих газов определяется по формуле 3.2.:

$$\begin{aligned} Q_{\text{н}} &= 0,126 \times \text{CO} + 0,108 \text{H}_2 + 0,238 \text{H}_2\text{S} + 0,385 \text{CH}_4 = \\ &= 0,126 \times 14 + 0,108 \times 12 + 0,238 \times 0,2 + 0,385 \times 0,1 = \\ &= 1,764 + 1,296 + 0,476 + 0,0358 = \mathbf{3,143 \text{ мДж/м}^3}. \end{aligned}$$

1.2.3. Так как отходящие газы содержат большое количество водяных паров, теплота сгорания их $Q_{\text{н}}$ значительно ниже $Q_{\text{н}}$ сухой составляющей газов. Объём влажных газов определяют по формуле $V_{\text{вг}} = V_{\text{сг}}(1 + d_{\text{г}}/0,805)$. Отсюда объём отходящих газов составит $V_{\text{вг}} = V_{\text{сг}}(1 + 302/0,805) = 1,375 V_{\text{сг}}$. Необходимо отметить, что, как правило, расчёты проводятся на сухую часть газов, тем более, что и анализ газов определяет состав только сухой части отходящих газов. Количество водяных паров определяется обычно расчётным путём. Исходя из фактического объёма отходящих газов ($V_{\text{вг}} = V_{\text{отг}} \text{ г.}$) теплота сгорания влажных отходящих

газов составит: $3,143/1,375=2,286 \text{ мДж/м}^3$.

1.2.4. Теоретический объём воздуха, необходимый для сжигания 1 м^3 сухих отходящих газов определяем из уравнения:

$$V_{0.\text{воз.}} = [0,5 (\text{CO} + \text{H}_2) + 2\text{CH}_4 + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2] \cdot 1/21. \\ = (7 + 6 + 0,2 + 0,3 - 1,0) \cdot 1/21 = 0,595 \cdot \text{м}^3/\text{м}^3 \text{сг.}$$

Из-за несовершенства смесеобразования подача теоретического количества воздуха не обеспечивает полного сгорания газа, так как в отдельных зонах факела может быть недостаток воздуха, поэтому для обеспечения полного сгорания газа во всех зонах факела воздух подают с некоторым избытком. Отношение действительного объёма воздуха, подаваемого для сжигания (V_V), к теоретическому необходимому объёму воздуха ($V_{0В}$) называется коэффициентом избытка воздуха (α). $\alpha = V_V / V_{0В}$.

При сжигании отходящих газов производства техуглерода для хорошего смешивания газов с воздухом требуется значительный избыток воздуха в связи с большим объёмом газов. Коэффициент избытка воздуха α принимают 1,1– 1,15. Но сначала для определения жаропроизводительности отходящих газов необходимо определить объём продуктов сгорания газов при $\alpha=1,0$.

1.2.5. Объём продуктов сгорания при $\alpha=1,0$ составит:

$$- V_{\text{CO}_2} = 0,01 (\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4) = 14 + 3 + 0,1 = 0,171 \text{ нм}^3 / \text{м}^3 \text{сг.}$$

$$- V_{\text{SO}_2} = 0,01 \text{H}_2\text{S} = 0,01 \cdot 0,2 = 0,002 \text{ нм}^3 / \text{м}^3 \text{сг.}$$

$$-VN_2=0,79 \cdot V_{O_2} + 0,01 \cdot N_2=0,79 \cdot 0,595 + 0,01 \cdot 69,7=0,47 + 0,697=1,16705 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ сг.}$$

$$-VH_2O=0,01 [H_2+2CH_4+H_2S+0,124 \cdot (d_{г} + \alpha \cdot V_{O_2} \cdot d_{в})]=0,01(12+0,2+0,2)+0,124 \cdot 310,93=0,5095 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ сг.}$$

Полный объём продуктов сгорания составит:

$$V_{пс} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{H_2O}=0,171+0,002+1,167+0,5095=1,8495 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ сг.}$$

1.2.6. Определение жаропроизводительности отходящих газов.

Для определения жаропроизводительности сравнивают теплосодержания продуктов сгорания при разных температурах с низшей теплотой сгорания отходящих газов. Обычно достаточно подсчёта величин теплосодержаний при двух температурах. Теплосодержание продуктов сгорания определяют по формуле: $Q_{пс} = V_{пс} \cdot C_p \cdot T_{г}$.

где $V_{пс}$ —объём продуктов сгорания; C_p —средневзвешенная теплоёмкость продуктов сгорания при температуре горения; $T_{г}$ — температура горения.

Задаются примерной величиной жаропроизводительности T_1 отходящих газов и определяют теплосодержание продуктов сгорания при этой температуре. Если теплосодержание будет ниже рассчитанной теплоты сгорания Q_n , то задаются температурой на 100°C . выше и повторяют подсчёт. Если величина теплосодержания будет выше Q_n , то повторяют подсчёт при температуре на 100°C . ниже T_1 . Для расчётов

все данные имеются, теплоёмкости газов берём из таблицы 3.1.

Примем $T_1 = 1000^\circ\text{C}$. и определим теплосодержание продуктов сгорания отходящих газов при этой температуре:

$Q_1 = 1000 \cdot (0,38 + 1,631 + 0,88) = 1000 \cdot 2,895 = 2895 \text{ кДЖ/м}^3$
или $2,895 \text{ МДж/м}^3$. Поскольку эта величина ниже Q_n ($3,143 \text{ МДж/м}^3$), следовательно, жаропроизводительность отходящих газов выше 1000°C . Задаёмся температурой 1100°C . и повторяем расчёт теплосодержания

$Q_2 = T_2 (V_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} \cdot C_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}) = 1100$
 $(0,171 \cdot 2,2525 + 1,1677 \cdot 1,4087 + 0,50595 \cdot 1,768) =$
 $=$ 1100
 $(0,38518 + 1,645 + 0,8945) = 1100 \cdot 2,9285 = 3221,46 \text{ кДЖ/м}^3$ или
 $3,22146 \text{ МДж/м}^3$.

Полученная величина выше теплоты сгорания отходящих газов. Следовательно, жаропроизводительность отходящих газов находится между температурами 1000 и 1100°C . Эту температуру определяем из соотношения:

$$TK = T_1 + (T_2 - T_1) \cdot \dots = 1000 + 100 \cdot 0,76 = 1076^\circ\text{C}.$$

Таким образом, жаропроизводительность отходящих газов производства техуглерода составляет **1076°C** .

Эту температуру можно определять и методом последовательных приближений, изменяя температуру до получения нужного результата/3.7.3./ стр.211. Покажем это на том же примере.

Примем в первом приближении, что температура продук-

тов сгорания равна 1100°C ., тогда, используя формулу (3.4.) получим:

$$T_1 = = 1072,7^{\circ}\text{C}.$$

Уточним теплоёмкости (с применением интерполяции), считая температуру продуктов сгорания 1075°C .. С учётом этих данных во втором приближении получаем:

$$T_2 = = = 1076,4^{\circ}\text{C}.$$

Различие между температурой, определённой во втором приближении, и той температурой, при которой определяли, теплоёмкости составляет всего $1,4^{\circ}\text{C}$., поэтому делать следующие приближения не имеет смысла. Принимаем $T_{ж} = 1076^{\circ}\text{C}$., что равно температуре рассчитанной по первому методу.

В приведённом примере результат получился уже со второго приближения, обычно требуются несколько приближений, поэтому этот метод более трудоёмкий, но он хорошо подходит для проверки результата, полученного по первому методу.

3.4.1 Однако, для практических целей обязательно нужно знать температуру продуктов сгорания газов в печах дожига, топках сушильных барабанов, топках котлов. Для этого не нужно специально определять теоретическую температуру. Действительную температуру определяют по формуле (3.5.) Калориметрическую температуру отходящих газов определяем по формуле (3.4.):

$$t_{\text{КАЛ.отх.газ.}} = \frac{Q_{\text{н}}}{\dots}, \text{ где в знаменателе } Q_{\text{н}} \text{—теплота сгорания}$$

газов; $Q_{\text{в}}$ – теплосодержание воздуха, подаваемого для сжигания газов; $Q_{\text{г}}$ – теплосодержание газов. В числителе указаны сумма произведений объёмов продуктов сгорания газов (CO_2 , N_2 , H_2O) на теплоёмкости газов, и произведение объёма избыточного воздуха ($\alpha > 1,0$) на теплоёмкость воздуха. Теплоёмкости продуктов сгорания отходящих газов и воздуха берём из таб.3.1.

Определим калориметрическую температуру продуктов сгорания отходящих газов в топке сушильного барабана БСК-40., приняв в первом приближении, что температура продуктов сгорания составит 1200°C ., тогда:

$$T_{\text{кал.топ.}} = 1202,5^{\circ}\text{C}.$$

Различие между температурой, найденной в первом приближении, и температурой, при которой определяли теплоёмкости, составляет всего $2,5^{\circ}\text{C}$. Дальнейшее уточнение теплоёмкостей может изменить температуру только примерно на 1°C ., поэтому делать следующие приближения не имеет смысла. Тем более, что теплосодержание продуктов сгорания отходящих газов в топке камеры обогрева сушильного барабана составляет: $3,0487 \cdot 1200 = 3658,44 \text{ кДж/м}^3$, что близко по величине к теплоте сгорания газов в топке (3666 кДж/м^3). Такая проверка подтверждает правильность расчёта температуры продуктов сгорания отходящих газов

С учётом пирометрического коэффициента определим температуру продуктов сгорания отходящих газов на выходе из топки, т.е. на входе в сушильную камеру барабана:

Так как потери тепла в топке сушильного барабана составляют 5%, пирометрический коэффициент n составит: $1,00-5/100=0,95$.

$$T_{\text{топ.}} = n \cdot T_{\text{к.топ.}} = 0,95 \cdot 1200^{\circ}\text{C.} = 1140^{\circ}\text{C.}$$

Следует отметить, что теплосодержание газов, ($3666,1 \text{ кДж/м}^3$) рассчитывалось на сухую часть газов, теплосодержание влажных газов составит $3666,1/1,375 = 2666 \text{ кДж/м}^3$.

3.4.2. Определим температуру продуктов сгорания отходящих газов в печи дожига газов.

Эту температуру также определяем по формуле (3.5.), т.е. $T_{\text{дейст}} = n_{\text{пир}} \cdot T_{\text{к.АЛ}}$. Калориметрическую температуру определяем так же, как и для топки камеры обогрева. В отличие от условий сжигания отходящих газов в топке, в печь дожига газов подаётся холодный воздух. Теплоёмкости принимаем из условия, что температура продуктов сгорания составит 1125°C . (Предварительно проведено три приближения.)

$T_{\text{к.печи.}} = (Q_{\text{H}} + \alpha \cdot V_{\text{в.св.}} \cdot T_{\text{в}} + V_{\text{г.сг.}} \cdot T_{\text{г}}) / (\sum V_{\text{пс.Спс}} + V_{\text{изб.в.}} \cdot C_{\text{в.}}) = (3143 + 1,1 \cdot 0,595 \cdot 1,3 \cdot 20 + + 1,0 \cdot 1,34 \cdot 170) / (0,173 \cdot 2,259 + 1,167 \cdot 1,413 + 0,5095 \cdot 1,7622 + 0,0595 \cdot 1,3) = = 3388 / 3,021 = 1121,5^{\circ}\text{C}$. Различие между полученным результатом и той температурой, при которой определяли теплоёмкости составляет всего $3,5^{\circ}\text{C}$. (0,3%), поэтому полученную температуру считаем окончательной.

В связи с большой наружной поверхностью печи дожи-

га теплоотдача от печи дожига отходящих газов в окружающую среду составляет 10—12%., при этом температура газов перед дымовой трубой печи (без принудительного охлаждения) составит:

Тпечи = $0,9 \cdot 1121,5 = 1009^{\circ}\text{C}$., где 0,9 – пирометрический коэффициент ($n = 1,00 - 10/100 = 0,9$).

Такая температура не допустима для обмуровки (или металла) дымовой трубы. Поэтому перед дымовой трубой продукты сгорания отходящих газов необходимо охлаждать. По проектам охлаждение предусматривалось за счёт впрыска воды в боров печи дожига газов, что приводило к периодическому разрушению футеровки борова печи и необходимости довольно частых ремонтов. *Увеличения надёжности работы печи удалось достичь посредством охлаждения продуктов сгорания отходящих газов за счёт подсоса в печь воздуха через специальные отверстия. Это не только сократило количество ремонтов печи, но и понизило концентрацию вредных газов, в продуктах сгорания, удаляемых из печи дожига газов.* Печь дожига газов является важным агрегатом в технологической схеме производства техуглерода, так как при остановке печи дожига неизбежно снижается объём производства техуглерода в связи с невозможностью полного дожига отходящих газов. Поэтому надёжной эксплуатации печей дожига газов должно уделяться самое серьёзное внимание. Прежде всего, каждая печь дожига должна иметь индивидуальную дымовую трубу, не связанную с дымовыми

трубами котельных. Понижение температуры продуктов сгорания газов нужно производить за счёт смешивания их с холодным воздухом, печь должна иметь все необходимые контрольно-измерительные приборы, а также нужно периодически производить инструментальные замеры расходов отходящих газов.

3.4.3. Определим температуру горения смеси отходящих газов с природным газом.

Для стабилизации процесса горения отходящих газов производства техуглерода, а также для повышения температуры продуктов сгорания отходящих газов в горелки котлов, печей дожига газов и топки камер обогрева сушильных барабанов в дополнение к отходящим газам подают в небольших количествах природный газ.

Произведём расчёт температуры продуктов сгорания отходящих газов в топке камеры обогрева сушильного барабана при подаче в горелку 1,0% природного газа от объёма сухой части отходящего газа. Так как в составе природного газа содержится до 98,5% метана, для упрощения расчётов заменим объём природного газа на такой же объём метана. Это не повлияет на результаты расчёта. Произведём расчёт состава отходящих газов в образовавшейся смеси газов:

$CO = 14 \cdot 0,99 = 13,86\%$; $H_2 = 12 \cdot 0,995 = 11,88\%$;
 $CO_2 = 3,0 \cdot 0,99 = 2,97\%$; $O_2 = 1,0 \cdot 0,99 = 0,99\%$; $CH_4 = 0,1 \cdot 0,99 = 0,099\%$;
 $H_2S = 0,2 \cdot 0,99 = 0,198\%$; $N_2 = 69,7 \cdot 0,99 = 66,003\%$; природный газ (CH_4)=1,0). Итого– 100%.

Рассчитаем теплоту сгорания смеси газов:

$$Q_{н.см} = 0,126CO + 0,108H_2 + 0,238H_2S + 0,385CH_4 = \\ 0,126 \cdot 13,86 + 0,108 \cdot 11,88 + 0,238 \cdot 0,198 + 0,385 \cdot (0,099 + 1,0) = \\ 1,74636 + 1,283 + 0,04712 + 0,4231 = 3,4996 \text{ МДж/м}^3. \\ (3499,6 \text{ кДж/м}^3).$$

Объём воздуха, необходимый для сжигания 1 м^3 смеси газов составит:

$$V_0 \text{ возд.} = [0,5(CO + H_2) + 2CH_4 + 1,5H_2S - \\ O_2] \cdot 1/21 = (12,87 + 2,198 + 0,732 - 0,99) \cdot 1/21 = 14,81/21 = \\ = 0,705 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Определим объём продуктов сгорания смеси газов:

$$V_{CO_2} = 0,01(CO + CO_2 + CH_4) = 0,01(13,86 + 2,97 + \\ 1,099) = 0,1793 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{SO_2} = 0,01 \cdot H_2S = 0,01 \cdot 0,198 = 0,00198 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_0 \text{ в} = 0,21 \cdot 0,1 \cdot 0,705 = 0,0148 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot \alpha \cdot V_0 \text{ в} + 0,01 \cdot N_2 = 0,79 \cdot 1,1 \cdot 0,705 + \\ 0,01 \cdot 69,003 = 0,61264 + 0,69003 = 1,3026 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{H_2O} = 0,01 [H_2 + 2CH_4 + H_2S + 0,124 \cdot (d_r + \alpha \cdot V_0 \text{ в} \cdot d_b)] = \\ 0,01 [11,88 + 1,099 + 0,198] + \\ + 0,124 \cdot (302 + 1,1 \cdot 0,705 \cdot 16) = 0,01 \cdot (13,177 + 38,98) = \\ 0,52157 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{пр.сг.} = 0,1793 + 0,00198 + 0,0148 + 1,3026 + 0,52157 = \\ 1,9356 = 2,022 \text{ м}^3/\text{м}.$$

Определим теплосодержание смеси отходящего и природного газов при температуре смеси газов 170°C . и температуре воздуха 340°C .

$$Q_{см} = Q_{н.см.} + Q_{г} + Q_{в} = 3499,6 + V_{г} \cdot c_{г} \cdot T_{г} + V_{в} \cdot c_{в} \cdot T_{в} = 3499,6 + 1 \cdot 170 \cdot 1,34 + 1,1 \cdot 0,705 \cdot 340 = 4077,8 \text{ кДж/м}^3.$$

Рассчитаем калориметрическую температуру горения смеси природного и отходящего газов. Калориметрическую температуру определяем по изложенному выше методу последовательных приближений (п.1.2.6.Разд.4.3.).

Принимаем в первом приближении, что температура T_1 составит 1200°C ., тогда возьмём теплоёмкости газов из Табл.3.1. и определим расчётную величину температуры

$$T_1 = (3499,6 + 1 \cdot 170 \cdot 1,34 + 1,1 \cdot 0,705 \cdot 340 \cdot 1,325) / (0,1793 \cdot 2,2819 + 0,0148 \cdot 1,5063 + 0,00198 \cdot 2,15 + 1,3026 \cdot 1,43 + 0,52157 \cdot 1,7825) = 4077,8 / 3,2144 = 1269^\circ\text{C}.$$

Отсюда понятно, что расчётная температура значительно отличается от принятой в первом приближении, а теплосодержание продуктов сгорания $Q_1 = 3,2144 \cdot 1200 = 3857,3 \text{ кДж/м}^3$. меньше теплосодержания смеси газов ($4077,8 \text{ кДж/м}^3$). Поэтому во втором приближении принимаем температуру $T_2 = 1300^\circ\text{C}$. Определим теплосодержание продуктов сгорания при этой температуре, исходя из объёмов и теплоёмкостей газов CO_2 , N_2 , H_2O , SO_2 :

$$Q_2 = T_2 \cdot (0,1793 \cdot 2,3079 + 0,0148 \cdot 1,5154 + 0,52157 \cdot 1,8085 + 1,3026 \cdot 1,4305 + 0,00198 \cdot 1,525) =$$

$$= T_2 \cdot (0,4138 + 0,02243 + 0,94326 + 1,863 + 0,00302) = 1300 \cdot 3,24$$

м^3 . Эта величина больше величины теплосодержания смеси газов ($3874,5$), поэтому калориметрическую температуру определяем по формуле:

$T_{\text{кал.}} = T_1 + \Delta T = 1200 + 100 = 1200 + 100 \cdot 0,61 = 1261^{\circ}\text{C}$.
 $Q_{\text{топ}} = 0,95 \cdot 1261 = 1198^{\circ}\text{C}$.

Проведённые расчёты показывают, что при добавлении к отходящим газам 1,0% объёмных природного газа в расчёте на сухую часть газов, температура продуктов сгорания отходящих газов увеличивается примерно на 60°C ., теплота сгорания смеси газов при этом возрастёт на $100-100 = 11\%$.

3.4.4. Расчёты параметров отходящих газов на рабочий объём отходящих газов.

На практике производится измерение всего объёма отходящих газов т.е. влажных газов или, как принято говорить рабочего объёма отходящих газов, поэтому все характеристики влажных газов определяются в данном примере из соотношения $V_{\text{вл.г}} = V_{\text{с.г.}} \cdot 1,375$, рассчитанного в начале примера. Как уже указывалось, теплота сгорания влажных отходящих газов составит: $3143/1,375 = 2285,8 \text{ кДж/м}^3$. Определим теоретический расход воздуха для сжигания 1 м^3 влажных отходящих газов: $0,595/1,375 = 0,433 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ вл.г.}$ При коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,1$ необходимый объём воздуха для полного сжигания отходящих газов составит: $0,433 \cdot 1,1 = 0,476 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ вл.газ.}$ На эту величину и нужно ориентироваться в практической работе. Далее рассчитаем состав влажных отходящих газов:

$\text{CO} - 14/1,375 = 10,182\% \text{ об.}$ $\text{H}_2 - 12/1,375 = 8,727\% \text{ об.}$ $\text{O}_2 - 1,0/1,375 = 0,727\% \text{ об.}$

$\text{CH}_4 - 0,1/1,375 = 0,0727\% \text{ об.}$ $\text{H}_2\text{S} - 0,2/1,375 = 0,145\% \text{ об.}$

$N_2 - 69,7/1,375 = 50,691\% \text{ об.}$

$H_2O - 0,375/1,375 = 0,2727\% \text{ об.}$ $CO_2 - 3,0/1,375 = 2,182\% \text{ об.}$

Исходя из полученного состава влажных отходящих газов, для проверки можно рассчитать, например, теоретический расход воздуха, необходимого для обеспечения полного сгорания отходящих газов: $V_{0в} = [0,5(10,182 + 8,727) + 2CH_4 + 1,5H_2S - O_2] \cdot 1/21 = 9,4545 + 0,1454 + 0,2175 - 0,727 = 0,433 \text{ м}^3/\text{м}^3$, что соответствует первоначально рассчитанному значению ($0,595/1,375 = 0,433 \text{ м}^3/\text{м}^3$). Определим также теплоту сгорания влажных (рабочих) газов: $Q_H = 0,126 \cdot 10,282 + 0,108 \cdot 8,727 + 0,238 \cdot 0,145 + 0,385 \cdot 0,073 = 2.285,8 \text{ кДж/м}^3$. Это полностью подтверждает полученный выше результат.

Таким образом, при пересчёте показателей отходящего газа с сухой части газов на рабочий объём, уменьшается содержание газов, входящих в состав отходящих газов, плотность газов, теплота сгорания, теоретический объём воздуха, необходимый для обеспечения полного сгорания газов, уменьшаются объёмы продуктов сгорания. Это уменьшение относительное и происходит потому, что объём влажных (рабочих) газов больше, чем сухих. Не изменяются только значения температурных параметров, так как в формуле определения температуры пропорционально уменьшаются как числитель, так и знаменатель.

Расчёт процесса горения отходящих газов производства

техуглерода можно производить и сразу на рабочий объём, для этого достаточно знать только состав сухой части газов и влагосодержание отходящих газов. Далее определяют состав влажных газов, их плотность, теплоту сгорания, теоретический объём воздуха для сжигания 1 м^3 влажного отходящего газа, объёмы продуктов сгорания, жаропроизводительность, а за тем калориметрическую температуру и действительную температуру горения.

В практической работе расчётные данные являются только ориентиром для определения технологических параметров при эксплуатации теплоиспользующего оборудования. Основным параметром является расход отходящих газов. Он определяется для топки камеры обогрева сушильного барабана из теплового баланса процесса сушки техуглерода. Сложность заключается в том, что имеются погрешности в измерении расходов отходящих газов. Это связано как с переменным составом отходящих газов, так и с большими объёмами отходящих газов, что отражается на точности измерения приборов. Первоначально количество отходящих газов, подаваемых для сжигания в топку камеры обогрева сушильного барабана, определяется на основе расчёта процесса сушки техуглерода. Затем производится корректировка расходов отходящих газов, воздуха, природного газа (при его добавлении) для достижения необходимой температуры продуктов сгорания газов и обеспечения требуемого качества высушиваемого техуглерода.

В связи с тем, что в литературе по производству техуглерода отсутствуют расчёты сушки влажного гранулированного техуглерода с использованием в качестве топлива отходящих газов производства техуглерода, рассмотрим его отдельно.

3.5. Расчёт процесса сушки техуглерода в сушильном барабане БСК– 40.

3.5.1. Исходные данные.

Количество высушиваемого техуглерода с учётом возврата G2– 3500кг/час.

Начальная влажность техуглерода U1– 50%вес.

Конечная влажность техуглерода U2 – 0,3%вес.

Температура техуглерода на входе в барабан q1– 90⁰С.

Температура техуглерода на выходе из барабана q2– 160⁰С.

Начальная температура продуктов сгорания отходящих газов, поступающих в камеру обогрева сушильного барабана T– 1100⁰С.

Температура газов на выходе из камеры обогрева– 600⁰С.

Температура газов, поступающих в полость сушильного барабана t1– 600⁰С.

Температура газов на выходе из сушильного барабана t2 – 250⁰С.

Теплоёмкости продуктов сгорания отходящих газов в зависимости от температуры:

при 250⁰С.—C1= 1,405 кДж/(м³·град);

при 600°C .— $C_2 = 1,47 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$;

при 1100°C .— $C_3 = 1,57 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$.

Теплоёмкость водяных паров при 250°C . составит $1,532 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$ или $1,903 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$.

Теплоёмкость тухуглерода $C_m = 1,256 \text{ кДж}/(\text{кг}/\text{град})$.

Тепловые потери через стены камеры обогрева, смотровые глазки, корпус барабана, а также затраты тепла на нагрев воздуха, подсасываемого в камеру обогрева, примем в количестве 15% от расхода тепла на испарение влаги и нагрев материала.

3.5 2.Расчёт.

Количество влаги, испарённой в сушильном барабане:

$$W = G_2 \cdot (U_1 - U_2) / (100 - U_1) = 3500 \cdot (50 - 0,3) / (100 - 50) = 3500 \cdot (49,7/50) = 3479 \text{ кг/час.}$$

Количество тепла, расходуемого на испарение влаги и нагрев материала:

$$(Q_{\text{и}} + Q_{\text{м}}) = W \cdot (2501 + 1,903 \cdot t_2 - q_1) + G_2 \cdot C_m \cdot (t_2 - t_1) \\ = 3479 \cdot (2501 + 1,903 \cdot 250 - 90) + 3500 \cdot 1,256 \cdot (160 - 90) \\ = 10348114 \text{ кДж/час. С учётом тепловых потерь затраты тепла составят:}$$

$$10348114 \cdot 1,15 = 11900331 \text{ кДж/час.}$$

Определим количество тепла, передаваемого высушиваемому материалу конвекцией, то есть за счёт непосредственного контакта влажного материала и сушильных газов. Примем количество газов, необходимых для удаления паров во-

ды из сушильного барабана, в объёме $5000\text{м}^3/\text{час}$. Такой объём газов, с учётом паров воды, определён исходя из производительности турбовоздуходувки, удаляющей парогазовую смесь из сушильного барабана:

$Q_1 = 5000 \cdot (600^\circ\text{C} \cdot 1,47 - 250^\circ\text{C} \cdot 1,405) = 2653750\text{кДж/час}$,
где 1,47 и 1,405 – теплоёмкости продуктов сгорания отходящих газов при этих температурах.

Количество тепла, передаваемого влажному техуглероду контактным методом, то есть через стенки барабана составит:

$$Q_2 = 11900331 - 2653750 = 9246581\text{кДж/час}$$

Количество газов, омывающих сушильный барабан, составит:

$$V_{\text{г}} = \frac{9246581}{(1100 \cdot 1,57 - 600 \cdot 1,47)} = 9246581 / 845 = 10943\text{м}^3/\text{час}$$

Количество тепла, уносимое из сушильного барабана с газами и парами воды:

$$Q_3 = 5000 \cdot 1,405 \cdot 250 + (3479/0,805) \cdot 1,536 \cdot 250 = 1756250 + 1659548 = 3415798\text{кДж/час}$$

Потери тепла с газами, удаляемыми из камеры обогрева через дымовую трубу:

$$Q_4 = (10943 - 5000) \cdot 1,47 \cdot 600 = 5241461\text{кДж/час}$$

Общее количество тепла, затраченного в процессе сушки техуглерода:

$$Q_{\text{общ}} = (Q_{\text{и}} + Q_{\text{м}}) + Q_3 + Q_4 = 11900331 + 3415800 + 5241461 = 205575592\text{кДж/час}$$

Объём отходящих газов, использованных в топке камеры обогрева сушильного барабана, составит:

$Q_{\text{общ.}}/2666 = 20557592/2666 = 7711 \text{ м}^3/\text{час}$, где 2666 – теплосодержание влажных отходящих газов в топке камеры обогрева сушильного барабана в $\text{кДж}/\text{м}^3$.

Количество влажных отходящих газов, сжигаемых в топке камеры обогрева, можно определить также из соотношения объёмов сжигаемых газов и образующихся продуктов сгорания этих газов: $10943/1,38 = 7930 \text{ м}^3/\text{час}$ отходящих газов. Разница между этими результатами составляет 2,8%, что допустимо. Примем расход отходящих газов в топку сушильного барабана $8000 \text{ м}^3/\text{час}$.

3.5.3. Пояснение к расчёту процесса сушки техуглерода.

– В качестве сушильного агента используются продукты сгорания отходящих газов следующего состава: $\text{CO} - 10,182\%$, $\text{H}_2 - 8,727\%$, $\text{N}_2 - 50,691\%$, $\text{CO}_2 - 2,18\%$, $\text{CH}_4 - 0,0727\%$, $\text{H}_2\text{S} - 0,145\%$, $\text{O}_2 - 0,7272\%$, $\text{H}_2\text{O} - 27,27\%$. Итого 100%.

Здесь указан состав влажных (рабочих) газов из приведённого выше примера.

Объём продуктов сгорания отходящих газов при сжигании их в топке с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,1$ составляет в $\text{м}^3/\text{м}^3$: $V_{\text{CO}_2} = 0,12435$, $V_{\text{SO}_2} = 0,00145$, $V_{\text{N}_2} = 0,8832$, $V_{\text{O}_2} = 0,0091$, $V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,363$. Итого общий объём продуктов сгорания составит $1,38 \text{ м}^3$ на 1 м^3 сожжённых отходящих газов.

– Количество материала, поступающего в сушильный барабан, G_1 в расчёте не указано, так как это не влияет на результаты расчёта. Для справки: $G_1 = G_2 + W = 3500 + 3479 = 6479 \text{ кг/час}$.

– Теплота испарения складывается из теплоты парообразования, равной 2501 кДж/кг и теплосодержания перегретого пара при температуре его на выходе из сушилки (в этом расчёте 250°C).

– Количество тепла на испарение и нагрев материала рассчитаны в одном уравнении.

– Нужно учитывать, что в расчёте применяются значения как объёмной, так и массовой теплоёмкостей.

– При анализе расчёта данного процесса сушки техуглерода создаётся впечатление, что этот процесс сушки имеет низкую эффективность. Это не совсем верно, так как тепло газов, удаляемых из дымовой трубы камеры обогрева сушильного барабана, используется для нагрева воздуха, подаваемого в топку, и обогрева корпусов грануляторов, бункеров, течек и других поверхностей технологического оборудования во избежание налипания на них техуглерода /7.3.2./ стр.212.

3.6. Условия безопасности при работе с отходящими газами.

Рассматривая условия безопасной эксплуатации оборудования при использовании отходящих газов производства техуглерода, необходимо учитывать, что эти газы нельзя раз-

делять по месту нахождения их на том или ином переделе производства. Эти газы имеют определённый состав горючих компонентов и являются взрывопожароопасными с момента их выхода из реактора, то есть, после окончания процесса образования техуглерода. Рабочий состав газов (влажных газов) определяется окончательно после холодильника-испарителя, где газы охлаждаются до температуры, допустимой для аппаратов отделения улавливания, за счёт впрыска воды.

Все горючие газы в смеси с определённым количеством воздуха могут воспламеняться и взрываться. Минимальные и максимальные количества газа в газоздушных смесях, при которых может произойти их воспламенение, называются нижним и верхним пределами взрываемости. В табл.3.2. указаны пределы взрываемости отходящих газов производства техуглерода в смеси с воздухом, а так же горючих газов, входящих в состав отходящих газов, и природного газа, применяемого в производстве техуглерода.

Необходимо отметить, что пределы взрываемости (воспламенения) отходящих газов определены расчётным путём, исходя из пределов допустимого содержания кислорода в газах, образующихся при получении техуглерода.

Таким образом, отходящие газы могут воспламеняться и взрываться, если содержание их в газоздушной смеси превысит 47%. Если же содержание отходящих газов в газоздушной смеси достигнет 81%, то такая смесь не горит

и не взрывается из-за низкого содержания кислорода воздуха (4%). Однако данные об опасном содержании кислорода в отходящих газах производства в пределах 4–11% определялись давно. Документальных подтверждений таких испытаний нет, неизвестно, с какими отходящими газами проводились испытания, так как при получении различных марок техуглерода состав газов отличается. Поэтому в промышленности техуглерода уже длительное время максимальное содержание кислорода в отходящих газах допускается не более 2%. Тем не менее, аварии, связанные с загораниями и взрывами газов, образующихся при производстве техуглерода, происходили и вероятность их остаётся. Всё это происходило по одним и тем же причинам, связанным с повышением содержания кислорода в аппаратах и наличии в них источников огня. В данном разделе мы этого не касаемся, рассматриваться будут только требования безопасности при подаче газов в дожигательные установки и их использовании.

А требования эти просты и общеизвестны, их нужно только выполнять. Это, прежде всего, продувка трубопроводов отходящих газов и использование отходящих газов только при содержании в них кислорода менее 2,0%. Большое значение имеет и предварительный нагрев футеровки предтопок котлов и топков камер обогрева до температуры более 750⁰С. Считается, что при температурах, превышающих температуру воспламенения, смеси газов и воздуха горят при их любом объёмном соотношении/3.7.4./стр.22.

Что касается аварий и аварийных ситуаций, то они были как с камерами обогрева, так и с котлами. В источнике /3.7.5./стр.235. указывается, что при содержании в отходящих газах кислорода более 4,5% в горелках котла происходят взрывы. Наверное, раньше они и были. Однако, обычно при содержании в отходящих газах даже немного более 2,0% кислорода в горелках котлов начинается характерный шум, который объясняется проскоком пламени внутрь горелки. В этом случае необходимо принимать срочные меры для уменьшения содержания кислорода в отходящих газах.

Заключение.

Рассмотрев наиболее распространённые способы полезного использования химического тепла отходящих газов производства техуглерода можно сделать вывод, что наиболее эффективный способ использования химического тепла отходящих газов в настоящее время является обеспечение сушки техуглерода продуктами сгорания отходящих газов производства по следующим причинам:

- Усовершенствованная установка эксплуатируется более пяти лет и показала свою надёжность и эффективность, обеспечивая существенную экономию природного газа.
- Капитальные вложения не велики и быстро окупаются.
- Мероприятие не связано со сторонними потребителями пара.

3.7. Перечень использованной литературы.

3.7.1. О.Н. Брюханов, В.А. Жила

Природные и искусственные газы Москва АСАДЕМА
2004.

3.7.2. В.И. Ивановский Технический Углерод. Процессы
и Аппараты Омск, 2004.

3.7.3. Б.С. Белосельский

Технология топлива и энергетических масел Москва Из-
дательство МЭИ 2003

3.7.4. Использование газов в промышленных печах. Спра-
вочное руководство Л, Недра, 1967.

3.7.5. В.П. Зуев В.В. Михайлов Производство сажи. Изда-
тельство «Химия» Москва 1970

8. Приложение.

8.1. Зависимость средней объёмной теплоёмкости про-
дуктов сгорания от температуры.

8.2. Основные характеристики газов, применяемых в про-
изводстве техуглерода.

Наименование

Теплота

сгорания

QH, кДж/м³

Плотность

кг/м³

Пределы взрываемости в смеси с воздухом, % об.

Темпертура

воспламене-
ния, °С.

Жаропроизво-
дительность,
°С.

Теорети-
ческий объём воздуха для полного
сгорания
газа, м³/м³

Метан CH₄

35715

0,717

4,9–15,4

654–690

2040

9,52

Природный газ

35380–35800

0,72–0,75

4,9–15,4

560–800

2000–2050

9,45–9,55

Отходящие газы производства техуглерода

1900–2700

1,02–1,08

47–81 (содержание кислорода в смеси от 4 до 11%)

600–750

950–1100

0,45–0,55

Окись углерода CO

12640

1,25

12,5–74,2

610–658

2370

2,381

Водород H₂

10790

0,089

4,0–74,2

530–590

2230

2,381

Сероводород H₂S

23844

1,536

4,3—45,5

290—487

2530

7,14

.