

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа «Оптимизация работы энерготехнологического комплекса автогенной плавки в жидкой ванне» содержит 82 страницы текстового документа, 15 использованных источников, 14 рисунков и 5 таблиц.

ЭТК, МЕДЕПЛАВИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ПЕЧЬ ВАНЮКОВА, КОТЕЛ УТИЛИЗАТОР, УХОДЯЩИЕ ГАЗЫ, ЖИДКАЯ ВАННА, ДВУХСВЕТНЫЕ ЭКРАНЫ.

Объект исследования – котел-утилизатор в качестве элемента ЭТК ПВ для охлаждения отходящих из плавильной печи технологических газов и удовлетворяющего технологические требования медно-никелевого производства.

Цель работы – оптимизация конструкции энерготехнологического комплекса автогенной плавки в жидкой ванне (ЭТК ПВ).

Изложены проблемы работы энерготехнологических комплексов плавки в жидкой ванне (печах Ванюкова).

Дана краткая техническая характеристика котла-утилизатора РКК-20/40 разработанного Центроэнергоцвететом. Представлены разные конструкции печей и котлов-утилизаторов.

Рассмотрены особенности теплотехнологических процессов в опытно-промышленной печи ПЖВ-20 для плавки медьсодержащей шихты в жидкой ванне.

Предложена рациональная конструкция ЭТК ПВ, включающая печь Ванюкова и котел-утилизатор РКК-20/40 и проведен теплотехнический расчет проектного варианта котла-утилизатора РКК-20/40 ЭТК.

Предложена рациональная конструкция КУ с пятью двухсветными экранами в радиационной части.

СОДЕРЖАНИЕ

	С.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АГРЕГАТЫ И ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ПЛАВКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	6
1.1. Классификация печей по принципу теплогенерации.....	6
1.2. Печи для плавки медных концентратов на штейн.....	11
1.2.1. Особенности конструкции печей.....	16
1.2.2. Тепловой и температурный режимы работы автогенных печей.....	23
1.2.3. Проблемы работы энерготехнологических комплексов плавки в жидкой ванне (печах Ванюкова).....	29
1.3. Котлы-утилизаторы для агрегатов цветной металлургии.....	32
1.4. Постановка задач работы.....	41
2. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ПЕЧЬ ВАНЮКОВА – КОТЕЛ-УТИЛИЗАТОР» (ЭТК ПВ).....	43
2.1. Особенности конструкции и теплообмена в ЭТК ПВ.....	43
2.2. Выбор конструкции котла-утилизатора.....	49
2.3. Разработка рациональной конструкции элементов ЭТК ПВ.....	53
2.4. Выводы по главе 2.....	54
3. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ЭТК ПВ.....	55
3.1. Теплотехнический расчет котла-утилизатора.....	55
3.2. Совершенствование конструкции камеры нагрева котла-утилизатора.....	76
3.3. Выводы по главе 3.....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	80
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	81

ВВЕДЕНИЕ

Металлургия меди и других тяжелых цветных металлов занимает одно из главных мест цветной металлургии России. Значимая часть валовой продукции отрасли нашей страны приходится на долю тяжелых цветных металлов. Потребность в меди растет с каждым годом все больше и больше, особенно в связи с бурным развитием ведущих отраслей нашей страны, например, как: энергетика, машиностроение, электроника, авиационная, космическая и атомная техника. Развитие в будущем и технический уровень производств меди и никеля во многом определяют технический прогресс нашей страны во многих отраслях, в которых она необходима для производства товаров. Так, чтобы получить медь на производстве могут использоваться различные способы плавки, например, плавка медных концентратов в электрических, шахтных, отражательных печах, при использовании процесса конвертирования медных штейнов, которые можно получить с помощью автогенной плавки во взвешенном состоянии, на штейне и других. На данный момент, существует несколько основных процессов, использующихся в автогенных плавках, это такие процессы как: «Норанда», «Мицубиси», «Уоркра» и Ванюкова.

Так, например, в настоящее время в промышленности предложено и находится в стадии реализации значительное количество автогенных процессов окисления сульфидов в расплавах. При этом количество новых предложения непрерывно увеличивается. Одним из основных способов в совершенствовании производства меди приходится на разработку и внедрение автогенных процессов на производстве. Автогенные установки способствуют интенсификации металлургического производства, а именно, существенно снизить затраты на топливо и энергоресурсы, и существенно улучшить экологическую обстановку на предприятиях и территориях, расположенных вблизи них, а также это дает возможность автоматизировать производственную деятельность и повысить условия труда. Анализ литературных источников и опыт эксплуатации энерготехнологических комплексов автогенной плавки в жидкой ванне (печах

Ванюкова – ЭТК ПВ) показывает на недостаточную изученность в них теплотехнологических процессов, что не дает разработать рациональные конструкции печей и компоновку элементов комплекса, а также не представляется возможным учесть их общее влияние на показатели теплообмена. На сегодняшний день одним из наиболее узких мест в работе энерготехнологического комплекса ПВ является утилизация теплоты отходящих газов. Именно поэтому котлы-утилизаторы (КУ), которые используются в ЭТК ПВ в большинстве своем работают неустойчиво, что будет сказываться на работе всего комплекса в целом. Одной из основных причин по которой КУ может приходиться в негодность заключается в засорении их поверхностей нагрева технологическими уносами. Засорение поверхностей нагрева уносами, может происходить на производстве из-за несоответствия разработанных на основе принципов энергетического котлостроения конструкций КУ, условиям работы на отходящих из ПВ агрессивных, высокотемпературных запыленных газов. Именно поэтому одной из актуальных задач является совершенствование конструкций котлов-утилизаторов на основе исследования теплообмена в ЭТК ПВ.

Цель представленной бакалаврской работы – оптимизация конструкции энерготехнологического комплекса автогенной плавки в жидкой ванне (ЭТК ПВ).

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- рассмотрены особенности конструкции и тепловой работы агрегатов и элементов энерготехнологических комплексов плавки цветных металлов;
- рассмотрены особенности конструкции и теплообмена в ЭТК ПВ, установлены проблемы его надежной работы;
- проведен выбор рациональной конструкции КУ для ЭТК ПВ;
- проведен теплотехнический расчет выбранной конструкции КУ;
- разработаны рекомендации для повышения и эффективности работы ЭТК ПВ.

1. АГРЕГАТЫ И ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ АВТОГЕННОЙ ПЛАВКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

1.1. Классификация печей по принципу теплогенерации

Генерация теплоты в печи – это процесс преобразования химической или электрической энергии в тепловую энергию. Печи, по источнику тепловыделения делятся на три группы: топливные, электрические и автогенные.

Топливные печи

Наибольшее распространение получили печи топливного назначения. В металлургических печах может использоваться топливо всех видов, а именно: твердое, жидкое и газообразное. Однако условия применения топлива таких видов совсем разные. Как по схеме теплогенераторов, так и по схеме теплообменников могут работать топливные печи. Слоевые печи, работающие на твердом топливе, совмещают зоны теплогенерации и технологического процесса, поэтому они работают как печи-теплогенераторы, где происходит массообменный режим их тепловой работы.

В топливных печах источником теплоты является химическая энергия всех трех состояний топлива, где теплота будет выделяться в результате сгорания топлива в печах. В результате сгорания продуктов топлива выделяются дымовые газы, которые являются теплоносителями и в дальнейшем могут использоваться как ВЭР.

Существует два вида металлургических печей: пламенные и слоевые. Отличительной чертой пламенных печей является то, что рабочее пространство таких печей в небольшом количестве заполнено обрабатываемым материалом, расположенном на поду, а остальное пространство заполнено пламенем и дымовыми газами, которые передают тепло рабочему материалу.

Современные пламенные печи могут работать на газе или с жидким топливом, которым в большинстве случаев является мазут. Есть несколько видов устройств

для подготовки топлива к сгоранию, например, для того чтобы сжечь газообразное топливо используются горелки, если же говорить о жидком топливе, то тут будут уже применяться форсунки.

Существует несколько разновидностей пламенных печей: сталеплавильные (мартеновские) печи, печи для плавки медных концентратов на штейн, печи прокатного и кузнечнопрессового производства: нагревательные колодцы, кольцевые, печи с выкатным подом и другие.

Если говорить о слоевых печах, то на данный момент известны три типа: с плотным, с "кипящим" и со взвешенным слоем обрабатываемого материала.

В печах с плотным слоем шихта обычно располагается по всему пространству печи, а горячие газы, в свою очередь, двигаются через слой шихты. К печам с плотным слоем относятся доменные печи, печи для изготовления извести путем обжига известняка, вагранки, печи никелевых и свинцовых заводов, которые широко используются в металлургических производствах.

В печах со взвешенным слоем обрабатывают материалы, которые уже находятся в пылевидном состоянии, т.е. каждая частица такого материала находится во взвешенном состоянии, которое происходит под действием потока газов, поднимающего снизу вверх, и движется совместно с потоком. В печах со взвешенным слоем обычно используют размельченное и газообразное топливо. Чаще всего эти печи используются в цветной металлургии для плавки сульфидов цветных материалов.

В таких печах как с кипящим слоем размельченная шихта имеет свойство разуплотняться под действием движущихся газов. Также существуют способы, когда в печь могут подавать газообразное топливо совместно с воздушным дутьем. Печи с кипящим слоем используются в большинстве случаев для обжига и сушки материалов в производстве цветной металлургии.

Электрические печи

Еще одной из разновидностью видов печей являются электрические печи – это такие печи, в которых в результате преобразования электрической энергии в тепловую энергию осуществляется нагрев, плавление или необходимые физико-химические превращения материалов (закалка, сушка, переплав и другие).

Переход электрической энергии в тепловую происходит за счет свойств теплогенерации:

- 1) когда ток проходит через газ;
- 2) когда происходит электрическое воздействие тока на магнитное поле
- 3) при поляризации перемагничивании диэлектриков;
- 4) когда ток проходит через твердые и жидкие тела;
- 5) благодаря кинетической энергии электронов.

Согласно принципу преобразования электрической энергии в теплоту существует три типа печей, которые применяются для промышленного производства металлов, к ним относятся: электродуговые, индукционные и печи сопротивления.

В печах индукционного типа используется способность переменного электрического тока создавать переменное магнитное поле вокруг проводника. Если в таком поле поместить нагреваемое тело, которое будет являться проводником, тогда в нем появится индукция вихревых токов. Энергия вихревого тока превращается в тепло, которая в дальнейшем выделяется внутри нагреваемого тела.

Для дуговых печей используется принцип пропуска электрического тока по газовому промежутку двух электродов. Это электрическое напряжение ионизирует газ между электрическими элементами и будет являться электропроводным. Таким образом, в газовых промежутках будет возникать так называемая электрическая дуга, являющаяся ярко светящимися смесями

электронов, заряженных положительных ионов, молекул и атомов. Возникающая дуга – это область, где энергия электричества превращается в теплоту, а температура дуги меняется в зависимости от диапазона температур от 3000 до 20000 К.

Так, работа печей сопротивления основывается на действиях закона Джоуля-Ленца о том, что при прохождении тока, проводник выделяет теплоту, которая будет пропорциональна его электрическому сопротивлению. Оба вида тока, постоянный и переменный, можно применять в печах сопротивления.

Электрические печи применяют в большинстве своем для выплавки стали, а также для требуемого нагрева металла перед обработкой давлением и металлообработки под давлением или для производства различных сплавов железа с другими элементами (ферросплавов).

Автогенные печи

Источником теплоты в таких печах является тепловое воздействие экзотермических реакций горения и окисления нескольких элементов, которые содержатся в материалах обработки. Наилучшим примером из автогенных печей в черной металлургии являются кислородные, сталеплавильные конвертеры и дуговые печи сталеплавильных материалов. В таких печах, когда происходит продувка жидкого чугуна с помощью кислорода осуществляется окисление углерода и многих других элементов, где будет происходить выделение теплоты. Такой процесс происходит без топливного расхода. В цветной металлургии при производстве сульфидных материалов основным источником теплогенерации будет являться процесс выгорания серы, которая содержится в них.

Существуют печи, где тепловыделение вызвано как химической энергией топлива, так и химической энергией жидкого металла. К таким печам относят мартеновские печи, так как именно они стоят между топливными печами и конвертерами. В таких печах происходят процессы, которые только характерны для пламенных печей, а именно горение топлива, раскаленные газы и пламя происходят именно над ванной металла. Получается так, что в ванне выгорают

примеси и все это дело происходит со значительными выделениями энергии, что в некоторых случаях плавления теплогенерация сыграет важную роль.

Таким образом, одной из самых известных из автогенных печей является автогенная плавильная печь, именуемая печью Ванюкова, она служит для переработки медных, свинцовых, никелевых и других компонентов. Плавка в таких печах, происходит в шлако-штейновой ванне, куда подается кислород смешанный с воздухом в виде смеси.

Существует несколько классификаций металлургических печей. Первая классификация – по технологическому назначению: нагревательные и плавильные.

Первые печи, предназначаются чтобы с помощью обжига и сушки придать металлу некие пластические свойства, которые нужны для изменения внутреннего строения и структуры. Но стоит принять во внимание, что нагревательные печи все-таки не меняют агрегатное состояние металлов.

В плавильных печах уже происходит изменение агрегатного состояния материалов и металлов. Эти печи требуются для извлечения металла из руд и его дальнейшей переработки и придания необходимых свойств.

Следующая классификация – от схемы, по которым работают печи: печи-теплообменники, где теплообразование рабочего материала зависит лишь от теплопередачи из зоны теплогенерации и печи-теплогенераторы, в которых тепло как появляется, так и остается в процессе.

Если говорить о наиболее популярных печах в производстве цветных металлов, то ими являются теплогенераторные печи. В таких печах происходит теплогенерация путем выработки серы и процессы, которые происходят в них являются автогенными.

1.2. Печи для плавки медных концентратов на штейн

Автогенными являются технологические процессы, где необходимый температурный уровень технологии обеспечивается только путем внесения тепла, который вносится исходным материалом, и теплоты самого процесса, отходящей от экзотермических реакций. Поэтому автогенный процесс осуществляется без потребления углеродного топлива и электроэнергии напрямую в рабочей зоне агрегатов. Так, в производстве металлов имеется группа реакций, которые дают необходимый экзотермический эффект для автогенного процесса – это реакции, которые окисляют компоненты исходного сырья кислородом. При таких реакциях степень десульфуризации регулируется в требуемом пределе, посредством изменения соотношения дутья и перерабатываемого материала.

Отличительной чертой тепловой работы печей автогенных плавков является то, что температура отходящих газов выше температуры плавления шлаков, следовательно, выше 1200...1250 °С. Чем выше будет температура отходящих газов, тем будут значительнее потери теплоты в процессе. В таком процессе, как пиритный, при использовании холодного воздушного дутья теплоты от сжигания сульфидов этого достаточно для обеспечения процесса плавки, то уже при автогенной плавке флотационных концентратов возможен значительный её дефицит. Таким образом, благодаря предварительному подогреву дутья, может быть получена требуемая теплота для процесса плавки печи.

Продолжительные исследования, направленные на изучение тех сфер, где применяются химические энергии сульфитов для производства меди, дали результат в начале 50-х гг. XX века, когда появились совершенно новые промышленные агрегаты для плавки на штейн. Новые агрегаты имели большие преимущества перед старыми видами печи (к ним относились топливные и электрические), а именно такие печи позволяли значительно сокращать энергетические затраты, которые требовались на производстве при переработке шихты, а также они ликвидировали выбросы сернистого газа в атмосферу. При

эксплуатации таких печей, было выявлено то, что исходя из того какое перерабатываемое сырье используется на производстве – это будет влиять на принцип их работы, а также это задевало конструктивные и режимные параметры агрегата.

В наше время, традиционные технологические процессы, такие как: отражательная плавка, электроплавка и плавка в шахтных печах, не соответствуют современным экологическим требованиям, а также энергосбережению. Возможные способы их совершенствования не дадут нам полного решения поставленных задач, стоящих перед нами в полном объеме. Отражательные печи, которые ныне являются основными перерабатывающими агрегатами медного сырья, отличаются невысокой удельной производительностью, довольно высоким удельным расходом углеродистого топлива, а также большим объемом газов, где содержание сернистого ангидрида составляет порядка 1,0...2,5 %, выведение которых связано с существенными эксплуатационными и капитальными затратами на производстве. Ценные компоненты, которые участвуют при отражательной плавке теряются полностью, например, такие, как: сера, цинк, кадмий, рений и другие.

Плавка в электрических печах отличается большим энергопотреблением, поскольку само название электрических печей говорит о себе. При этом в отходящем газе содержание сернистого ангидрида небольшое из-за сложности герметизации печи.

На данный момент успешно проведены полупромышленные испытания автогенной плавки сульфидного сырья в шахтных печах с использованием дутья, который обогащен кислородом. Достоинствами плавки в шахтах являются сравнительно низкая температура отходящих газов из-за чего возникает большой тепловой коэффициент полезного действия по сравнению с другими процессами плавки в этой области производства. Эта плавка помогает нам обходиться без использования углеродистого топлива даже при малой концентрации серы в процессе. Более полное использование теплоты сгорания сульфидов позволяет

дальнейшее сокращение удельного расхода технического кислорода. Так же переработка концентратов, если используется метод шахтной плавки требуется их предварительного брикетирования и окатывание, что приводит к усложнению и влиянию на финансовую составляющую процесса.

В отличии от отражательной плавки наиболее выгодными являются автогенные процессы, которые осуществляются во взвешенном состоянии.

Применение таких процессов, происходящий при окислении сульфидов дутьем, который, в свою очередь, обогащен кислородом или техническим кислородом. Автогенные процессы позволяют эффективно снизить объем технологических газов, при этом увеличивая содержание сернистого ангидрида в них. В конечном итоге, утилизация серы отходящих газов позволяет увеличить экономичность процесса. Но в современных реалиях автогенные процессы не полностью соответствуют всем необходимым требованиям. В частности, они недостаточно выделяют из меди ценного сырья, т.к. при кислородно-факельной и финской плавках наблюдаются большие потери меди со шлаками: концентрация меди в первичных шлаках составляет порядка 1 %. Такие шлаки не могут быть отправлены в отвал и поэтому в дальнейшем их подвергают некой переработке.

Преимущества автогенных процессов заключаются в: значительной экономии энергии; сокращении доли ручной работы; повышении автоматизации процессов; увеличении производительности процессов; более высокой степени извлечения ценных компонентов рудного сырья; сокращении загрязнения воздуха и воды; использовании вторичных энергетических ресурсов для нужд собственного производства и других.

В зависимости от принципа работы агрегаты для автогенной плавки на штейн делятся на три вида:

- 1) печи для плавки концентратов во взвешенном состоянии в потоке технически чистого кислорода, которые называют печами кислородно-взвешенной плавки (КВП);

- 2) печи для плавки концентратов во взвешенном состоянии в потоке предварительно нагретого воздуха или дутья, в заранее обогащенного кислородом, которые имеют название печи взвешенной плавки (ПВП);
- 3) печи для плавки шихтовых материалов в среде барботируемого газообразным окислителем шлакового расплава, которые называются печами для плавки в жидкой ванне (ПЖВ), еще одно общепринятое название — это печь Ванюкова (ПВ).

Взвешенная плавка концентратов – является одной из наиболее используемых из всех известных процессов ранее, которая отличается высоким извлечением меди, малым объемом отходящих газов, возможностью получению элементарной серы из металлургических газов и возможностью автоматизировать значительную часть процесса.

Существуют такие процессы, в итоге которых мелкие сульфиды сжигают в факеле, который происходит при высокой температуре горения сульфидов шихты, которая подается в рабочее пространство печи вместе с дутьем горелками. Это выделяемое тепло способствует плавлению распыленной шихты, а появившиеся капли падают на поверхность шлакового расплава, который находится в отстойной камере, где расслаивается шлак и штейн.

Печи взвешенной плавки, используемые на кислородном дутье, выглядят в виде прямоугольной камеры, где в центре над сводом располагается вертикальный газоход. Переход от воздушного к кислородному дутью позволяет упростить конструкцию печи, с применением взвешенной плавки, тем самым не изменяя принцип ее работы. Если говорить о использовании кислородного дутья, то это позволит существенно по сравнению с воздушным снизить количество технологических газов, которые приходится на единицу массы перерабатываемого материала, а также происходит окисление сульфидов шихты в технологическом факеле в горизонтальном направлении, что при воздушном дутье дало бы сразу резкое повышение пылевыноса. Для того, чтобы защитить

футеровки от разрушительного свойства факела, требуется установка газохода по центру в печи.

Печь взвешенной плавки, используемая на воздушном дутье, является агрегатом, состоящим из вертикально расположенной реакционной камеры цилиндрической формы, горизонтального отстойника, а также соединенной с газходной системой сепарационной шахты. Сущность технологического процесса, который происходит в печи заключается в том, что: сухая шихта совместно с заранее подогретым дутьем подается в реакционную камеру агрегата, через специальные горелки, которые располагаются сверху, где уже потом происходит неполное окисление содержащихся в ней сульфидов. Благодаря выделившемуся в процессе тепла технологического факела, где произошло окисление железа и серы, осуществляется нагрев и дальнейшее расплавление шихтовых материалов. Капли расплава, который образовались под действием сил тяжести выпадают из газового потока и уже потом поступают на поверхность ванны расплава, которая располагается на подине отстойника. Именно в ванне завершаются процессы, где идет формирование шлака и происходит разделение жидких продуктов плавки на штейн и шлак, и когда они заполняют пространство их выводят из печи, а затем направляют для дальнейшей переработки на производстве. Технологические газы сначала проходят над ванной, а потом уже выходят из печи через сепарационную шахту, которая требуется для частичного удаления газового потока уносимых им сравнительно крупных частиц шихты, а также капель расплава. Затем технологические газы, которые содержат большой показатель сернистого ангидрида направляются на производство серной кислоты.

В печи для плавки шихты в жидкой ванне, технологический процесс происходит из-за воздействия тепловой энергии, выделяющейся непосредственно в среде барботируемого газообразным окислителем шлак-штейнового расплава. Чтобы провести процесс окисления в печи используют воздух, дутье, которое заранее обогащается кислородом или чистый кислород, используемый на производствах. Дутье проходит в расплав через фурмы,

находящиеся в боковых стенах печи. Газы, которые появляются при протекании процесса, взлетают на верхнюю поверхность ванны и интенсивно там перемешиваются, удаляясь через вертикальный аптейк, который установлен по центру печи. Затем переработанная шихта подается через специальное устройство для загрузки через верхнее отверстие. И когда шихта попадает на поверхность ванны, она проходит на дно расплава, перемешивается с ним и плавится из-за огромных температур. Продукты плавки в подфурменной зоне делятся на два вида: на шлак и штейн. И когда они продукты плавки заполняют отстойники их выпускают из агрегата через отстойники сифонного типа, находящиеся по обе стороны печи.

1.2.1. Особенности конструкции печей

Печи кислородно-взвешенной плавки (КВП)

В печи кислородно-взвешенной плавки проходят с высокими технико-экономическими показателями процессы как плавка и обжиг сульфидного медного концентрата, высушенного до 1 % влажности.

Такой процесс протекает автогенно без какого-либо потребления топлива, позволяя полностью применять содержащуюся в больших количествах серу порядка 33...37 %, получая газы с 73...77 % с содержанием сернистого ангидрида, против тех же 5 % в получаемых газах при применении отражательной плавки. Благодаря таким газам обеспечивается извлечение серной кислоты и элементарной серы, и что не мало важно исключает выброс сернистого ангидрида, который мог бы выделиться в окружающую среду.

Топливо-энергетические ресурсы при КВП (рисунок 1.1) расходуются только на производство кислорода, дутье, сушку концентрата и водоохлаждение. А вот если требуется нагреть воздушное дутье, то тут уже могут использовать тепло отходящих газов, которые проходят через котел-утилизатор. Тепло,

которое получают из водоохлаждаемых элементов печи утилизируется в КУ, где полученный пар может идти на производственные нужды.

Полученный концентрат осушается продуктами сгорания природного газа в двух вертикальных трубах-сушилках печи с диаметром 900 мм. Потом шихта из бункера поступает в трубу-сушилку забрасывателем, где она идет вместе с потоком горячих газов и через циклоны направляется в бункера, где используются шихта-кислородные грелки. В печь шихта поступает с потоком технического кислорода, где во взвешенном состоянии подвергается обжигу-плавке. Процесс происходит при температуре порядка 1350...1400 °С.

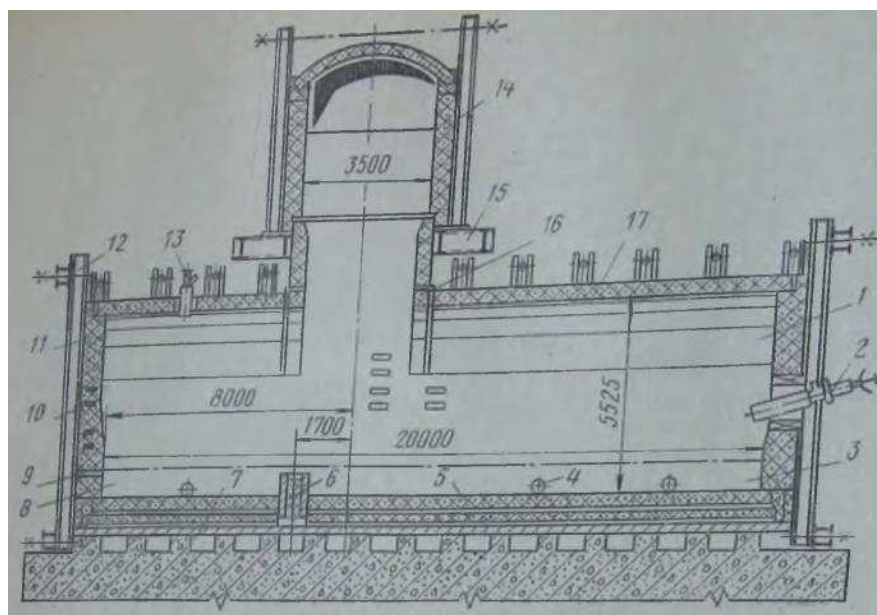


Рисунок 1.1 – Печь кислородно-взвешенной плавки:

- 1 – плавильная зона; 2 – кислородно-шихтовая горелка; 3 – ванна; 4 –штейновый шпур; 5 – подина; 6 – перегородка пароохлаждаемая; 7 – плиты чугунные; 8 – зона обезмеживания шлака; 9 – шлаковое отверстие; 10 – кессоны медные; 11 – стена; 12 – каркас; 13 – горелка пиритно-кислородная; 14 – вертикальный газоход (аптейк); 15 – опорная конструкция; 16 – кессонированная арка свода; 17 – свод распорно-подвесной

Затем происходит выпуск продуктов плавки: откуда штейн выходит через шпуровые устройства, которые находятся на продольных стенках печи, а компоненты шлака выходят через шпуры на торцевой стене пиритной стороны печи, газы выводятся через газоход и идут непосредственно в сам котел-утилизатор.

Фундамент печи сделан из жаростойкого бетона с опорными тумбами, где сделаны поперечные и продольные тяги каркаса. На тумбах крепят чугунные плиты, где на них укладывают стальные листы толщиной порядка 15...20 мм. На листах делают подушку из жаропрочного бетона) типа обратной арки. Делается три слоя подины: первый делается изоляционный из шамотного кирпича, второй делается из обычного кирпича, а третий делается из большемерного 450 мм кирпича, где между рядами еще делается засыпка хромомагнетитовым порошком. Подину засыпают таким же порошком и утрамбовывают. Стены в печи делают из периклазошпинелидного кирпича в ванне 575 мм и в зоне пятовых балок 450 мм.

Горелки в печи делаются двух видов, и являются водоохлаждаемыми. Первые из них – это горизонтальные, которые находятся на торцевой стенке печи, а вторые – это вертикальные, которые находятся на перекрытии продольной оси печи. Газовые горелки в печи используются в тех случаях, когда требуется разогрев печи после капитального ремонта, и тогда, когда может прекращаться подача кислорода и шихты.

В конструкции печи кислородно-взвешенной плавки присутствует соединительный газоход, который соединяет КУ с аптейком, он устанавливается на подине из водоохлаждаемых медных кессонов.

Шпуровые устройства практически одинаковые во всех печах, в том числе это касается и рассматриваемых печей. Размер шпуровых отверстий как показывает практика составляет не более 45 x 45 мм для штейна и не менее 100 x 100 мм для шлака. Если в печи будет использоваться сифонный выпуск штейна размер сечения канала не должно превышать значение 250 x 350 мм. Для выпуска

штейна и шлака используются медные водоохлаждаемые желоба, которые необходимо делать с определенным уклоном не менее 0,06. Все детали в устройствах требуют крепко закреплять клиньями. Для остановки подачи воды в шпуровых устройствах используется запорная арматура. Перед заливкой, ковши и шлаковые чаши нужные в использовании должны быть ошлакованными.

Отражательные печи

Основным направлением применения отражательных печей (рисунок 1.2) является плавка медных и медно-никелевых шихт, а также рафинирование черновой меди.

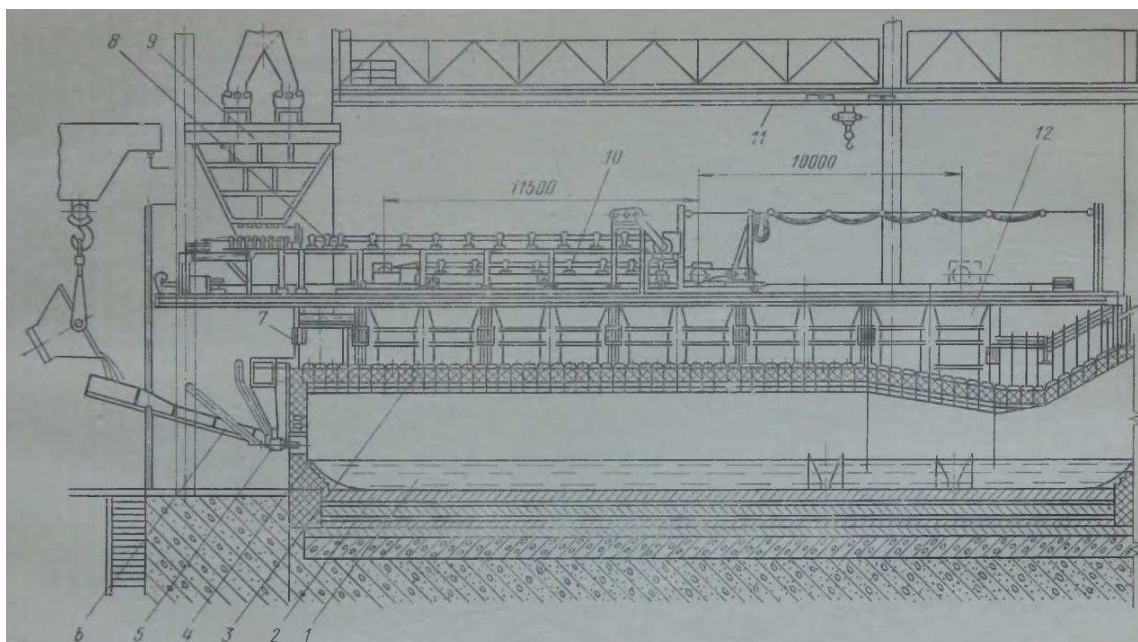


Рисунок 1.2 – Отражательная печь с подвесным сводом:

1 – ванная; 2 – подина; 3 – подвесной свод; 4 – передняя стена; 5 – горелка; 6 – желоб и ковш для заливки шлака; 7 – каркас; 8 – стационарный ленточный конвейер; 9 – бункер-накопитель шихты; 10 – челноковый ленточный конвейер; 11 – кран-балка; 12 – загрузочная воронка

Шихта, используемая в печи, располагается по обе стороны в так называемых откосах, именно они и будут задавать направление шихты к факелу

пламени, находящемуся прямо по центру печи. Раскаленный свод будет отражать потоки тепла, отводящиеся от топочных газов в печи.

Современные отражательные печи имеют внушительные размеры, где площадь пода может составлять 300...400 м².

При глубине ванны порядка 1 метра масса расплава находящейся в ней составляет порядка 1000...1200 т. Если рассматривать печь более крупных размеров, то тут масса расплава может достигать и превышать 2800 т.

Горелки устанавливаются в плавильной части печи, где благодаря этому находится самая высокая температура в печи, которая может достигать 1450...1540 °С. В конце печи происходит снижение температур до 1220...1270 °С, а на выходе из печи и вовсе составляет порядка 1090 °С.

Из-за внушительных размеров печи и больших температур отходящих газов, использование теплоты в печи является не высоким и находится в диапазоне 30...40 %, так как потери теплоты составляют 40...60 % и порядка 10...15 % от всего тепла уходит на потери в окружающую среду через стенки и свод печи. На производстве можно создать условия для утилизации тепла отходящий газов на величину равную 30...40 %, для этого потребуется установка котлов-утилизаторов за печами, это сможет дать производству дополнительную прибыль.

По всей подине ванны находятся шлаки и продукты плавки. При заполнении штейна, он убирается со дна из шпуров, находящиеся на боковых стенках печи, а шлак убирается из задней части печи.

Широко используется подогрев воздуха, который подается на горение до 200...350 °С за счет теплоты отходящих газов, такой процесс благоприятно сказывается на улучшение технико-экономических показателей и интенсификацию процесса плавки.

Если рассмотреть случай, когда берется холодное дутье и подогрев дутья до 500 °С, то во втором случае производительность печи сразу же возрастает на

27...29 %, а расход топлива значительно уменьшается на 35...38 %. Если использовать обогащенное дутье с содержанием 25 % кислорода – это способствует увеличению производительности печи на целых 10 % и уменьшению расхода топлива порядка на 9 %, а также в свою очередь такая процедура способна существенно уменьшить пылевывос на производстве.

Печи для плавки во взвешенном состоянии (ПВП)

Конструкция печи для плавки концентратов во взвешенном состоянии ПВП в потоке предварительно подогретого воздуха достаточно сложная (рисунок 1.3), так как она совмещает в себе две вертикальные шахты: реакционную и аптейк, а также горизонтальную камеру, именуемую отстойником. Кроме того, конструкция усложняется большим количеством элементов с водяным охлаждением, использование которых может существенно продлить эксплуатационный срок работы агрегата.

Тонкоизмельченная шихта, которая предварительно уже высушена до влажности менее 0,2 %, подается через специальную систему ленточных конвейеров и пневмотранспорта в загрузочный бункер. Из бункера шихту подают два скребковых транспортера через свод реакционной камеры с использованием четырех специальных горелок. Основным назначением горелки является приготовление и подготовка шихтово-воздушной смеси для ускорения горения сульфидов. Смешивание шихты с дутьем осуществляется путем разрушения струи шихты о конус-рассекатель, а затем дутье подается через воздушный патрубок и специальную распределительную решетку.

Конструкция печи выполнена в виде кирпичной кладки, состоящей из магнезитового кирпича. Облицовка реакционной шахты и газохода заключена в металлические кожухи, сделанные из листовой стали. Внутренняя стенка отстойной камеры имеет две медные водоохлаждаемые плиты, в которых есть отверстия для дальнейшего выпуска шлака, а в передней торцевой стене установлены чугунные шпурсы, позволяющие выпускать штейн.

В реакционной шахте обогащенный кислородом воздух, нагретый до 200 °С, используется для окисления компонентов концентрата.

Расплавленные частицы падают на поверхность поддона. В зоне отстаивания печи происходит расслоение сульфидно-силикатного расплава на два компонента: шлак и штейн. Чтобы поддерживать требуемую температуру шлака и штейна в зоне отстаивания, монтируются дополнительные горелки, использующиеся на природном газе.

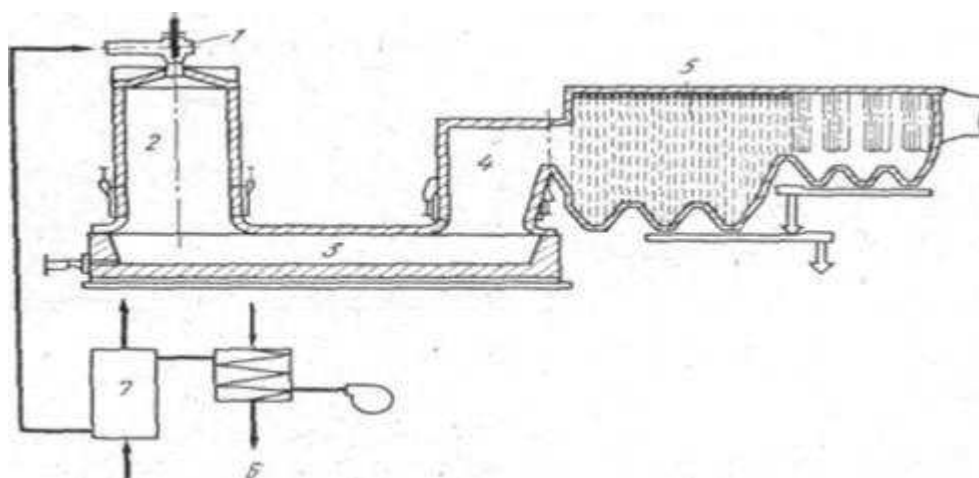


Рисунок 1.3 – Печь для плавки во взвешенном состоянии (ПВП):

1 – горелка; 2 – реакционная камера; 3 – отстойная камера; 4 – аптеик; 5 – котел-утилизатор;
6 – паровой воздухоподогреватель; 7 – топливный воздухоподогреватель

После газохода газы поступают в котел-утилизатор, где они существенно охлаждаются с 1350 до 550 °С, а далее, после очистки в электрофильтрах от пыли, направляются в серный цех для улавливания серы из газов. Количество пыли в печи взвешенной плавки составляет порядка 15 % от веса загруженной ШИХТЫ.

1.2.2. Тепловой и температурный режимы работы автогенных печей

Агрегаты для автогенной плавки на штейн относятся к печам смешенного типа, если их подразделять по энергетическому признаку, поскольку они нагревают газообразный окислитель и разнообразные компоненты шихты, которые впоследствии будут участвовать в экзотермических реакциях, в отличие от других продуктов плавки, получающих тепло путем теплообмена. Работа печей смешанного типа зависит от характера распределения тепла между продуктами плавки, то есть от процессов происходящих в теплогенерации и теплообмена. Если их рассматривать в качестве теплогенераторов, то они относятся к печам с массообменным режимом работы, где процессы массообмена будут получать за счет значительного увеличения реакционной поверхности сульфидов.

Анализируя работу печей в качестве печей-теплообменников, следует обратить внимание на то, что в таких печах будут значительно преобладать процессы, в которых перенос тепла будет осуществляться посредством излучения и конвекцией. На заключительном этапе получения расплава, в котором осуществляется образование расплава и его отделение на такие компоненты как: шлак и штейн, передача тепла будет происходить за счет теплопроводности через шлак и конвекцией, происходящей при осаждении штейна.

Тепломассообмен в автогенных плавильных установках характеризуется большим разнообразием и сложностью протекания процесса. Поскольку, такой процесс является относительно новым, по сей день нет данных, подтвержденных экспериментально о способе термической эксплуатации таких печей. Фактически, оценка рабочих параметров оборудования осуществляется на основе материалов и тепловых балансов, которые протекают в нем.

Автогенные печи являются агрегатами непрерывной работы и имеют постоянные температурные и тепловые рабочие параметры работы печи во

времени. При составлении теплового баланса технологического процесса, часто используются такие термины, как тепловые эквиваленты сырья и продуктов плавки. Тогда, уравнение теплового баланса описывающее плавление шихты выглядит следующим образом:

$$0,28A(Q_{\text{э.ш}}^{\Gamma} + Q_{\text{э.ш}}^{\text{T}} - n(Q_{\text{э.пр}}^{\Gamma} + Q_{\text{э.пр}}^{\text{T}}) - Q_{\text{ш}} - Q_{\text{д}} - Q_{\text{пот}}) = 0, \quad (1.1)$$

где A – производительность агрегата по проплавленной шихте, т/ч;

$Q_{\text{э.ш}}^{\Gamma}, Q_{\text{э.ш}}^{\text{T}}, Q_{\text{э.пр}}^{\Gamma}, Q_{\text{э.пр}}^{\text{T}}$ – теплогенерационные и теплообменные составляющие тепловых эквивалентов шихтовых материалов и продуктов плавки, кДж/кг;

n – коэффициент, равный отношению массы штейна к массе переплавляемой шихты;

$Q_{\text{ш}}, Q_{\text{д}}$ – теплопотребление шихты и дутья, которая идет на ее окисление, кДж/кг шихты;

$Q_{\text{пот}}$ – потери тепла через ограждающие поверхности печи, кВт.

Из уравнения (1.1) можно сделать вывод, что интенсивность теплообмена в рабочем пространстве печи (величина теплового потока $Q_{\text{п}}^{\text{T}}$) будет находиться по формуле, кВт:

$$Q_{\text{п}}^{\text{T}} = 0,28A(Q_{\text{э.ш}}^{\text{T}} - Q_{\text{э.пр}}^{\text{T}}) \quad (1.2)$$

Полученная интенсивность теплообмена должна будет соответствовать технологическим параметрам процесса, которые выбираются так, чтобы создать условия для полного разделения получившихся продуктов плавления в печи. Чем выше средняя температура во время процесса, тем больше это способствует уменьшению вязкости шлака и влиянию ускорения разделения продуктов

плавления в печи. С другой стороны, такое действие может повлиять на увеличение растворимости штейна в шлаке и увеличить химические потери меди со шлаком.

При переработке сырья, внутри процесса осуществляется окисление сульфидов при определенных заданных температур, установленных из экспериментальных значений. В результате окисления сульфидов получают соединения, являющиеся продуктами плавления, и их настоящая температура будет равняться средней температуре процесса. Из определения теплового эквивалента шихтового материала становится ясным, что условие будет выполняться при достижении максимального показателя требуемого теплового потока, поступающего от продуктов окисления реакций, и будет находиться по формуле, кВт:

$$Q_{\Pi} = 0,28A \left(Q_{x.ш} - Q_{\text{Э.ш}}^{\Gamma} - n(Q_{x.ш} + Q_{\text{Э.пр}}^{\Gamma}) \right) \quad (1.3)$$

где $Q_{x.ш}$, $Q_{x.пр}$ – теплота сгорания шихты и продуктов плавки, кДж/кг.

Расчеты из уравнения (1.2), делаются по исходным данным материального и теплового балансов плавки печей. Иногда чтобы произвести приближенные расчеты можно воспользоваться значениями термических эквивалентов шихты и штейна, кВт:

$$Q_{\Pi}^T = 0,28A(119,4S + 20,4Cu - 4001,5Sn((2,9S + 0,17Cu - 53,4)(T_0 - T_{\text{H}}^c)) + (1,2S + 0,26Cu - 40,08n(T_0 - T_{\text{H}}^d) \frac{100}{O_2}) 10^{-2}) \quad (1.4)$$

где S, Cu – содержание в шихте серы и меди, %;

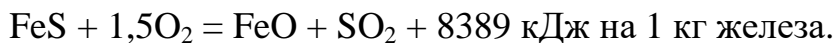
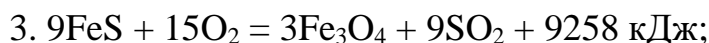
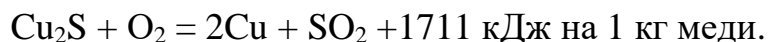
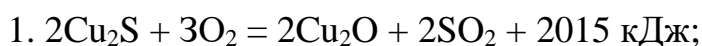
T_0 – заданное значение средней температуры в зоне технологического процесса, К;

T_H^c, E_H^d – исходные температуры шихты и дутья, К;

O_2 – содержание кислорода в дутье, %.

Значение, найденное по формуле (1.3), показывает, сколько тепла за единицу времени отводится в процессе теплообмена от продуктов окисления сульфидов, чтобы вовремя успеть предотвратить их перегрев по отношению к средней температуре в процессе.

Интенсивность теплообмена в пространстве печи определяется по способу протекания окислительной реакции, состоящего из многих стадий. Именно поэтому были выведены упрощенные двухстадийные модели для энергетической оценки происходящего процесса, принимающие вид уравнений:



При анализе формулы (1.1) – (1.4) становится понятно, что в многостадийном процессе количество тепла, которое выделяется в зоне окисления сульфидов, может совершенно отличаться от усредненной величины, которая будет рассчитываться исходя из данных теплового баланса процесса. Для завершения следующей стадии химических превращений, требуется чтобы тепло с первой стадии передано в зону протекания эндотермических реакций. Интенсивность теплообмена двухстадийного характера протекания процесса

окисления сульфидов рассчитывается на основе его материального и теплового балансов, определяющегося по формуле:

$$Q_{\text{энд}}^T = 0,28A(8,55 - 3,60Cu - 468,4n) \quad (1.5)$$

Тепло, которое отводится от продуктов окисления сульфидов идет на нагревание и плавление соединений из сульфидов, образовавшие штейн и другие компоненты шихты, а также на покрытие потерь тепла от стенок в окружающую среду.

Количество тепла в единицу времени, требуемое для того, чтобы подвести к компонентам шихты чтобы их нагреть, можно вычислить, если знать состав шихты и продуктов плавки.

Для приближенных расчетов можно использовать две формулы, имеющие вид:

$$Q_{\text{п.с}}^T = 0,28A(53,4n - 0,17Cu)(T_0 - T_H^c)10^{-2} \quad (1.6)$$

$$Q_{\text{п.ф}}^T = 0,28A(Q_{\text{ш}}(T_0) - Q_{\text{ш}}(T_H^c)) - Q_{\text{п}}^T \quad (1.7)$$

где $Q_{\text{п.ф}}^T$ $Q_{\text{п.с}}^T$ – потоки тепла, поступающие на поверхность сульфидных частиц и флюсов, кВт.

Расчеты, проведенные по формулам (1.5) – (1.7) показывают взаимосвязь характерную для основных параметров технологического, теплового и температурного режимов работы печей для автогенной плавки, а используются для количественной оценке экспериментальных данных.

Изменение параметров технологического процесса без изменений его энергетических параметров может повлиять на работу печей в целом и окажет существенное влияние на ухудшение тепловой работы комплекса из-за температурного режима плавки, который не будет соответствовать требуемым показателям. Так, если будет перерабатываться концентрат, в котором содержится 35 % и 19 % меди, в печи взвешенной плавки на кислородном дутье приведет к изменению концентрации меди в штейне к результату с 35...40 % до 45...50 %, это приведет к образованию промежуточного слоя магнетита между шлаком и штейном, а в дальнейшем это скажется на интенсивном образовании настывшей на подине печи, то есть будут в виде смеси застывшего шлака и штейна с большим содержанием магнетита.

Чем больше повышение десульфурации в факеле, тем будут сильнее окисляться сульфиды железа, а это значит то, что магнетитовый слой появляется именно по этой причине. Поэтому, в ванне, насыщенной магнетитом, будет увеличиваться скорость эндотермических реакций, где будет происходить охлаждение и затвердевание шлак-штейнового расплава в области их протекания. Анализ расчетных формул (1.4) и (1.6) показывает, что при переходе на получение богатого штейна в рассматриваемом случае процесс должен был сопровождаться интенсификацией теплообмена в зоне окисления сульфидов на величину равную 30 %, а в зоне, где происходило протекание эндотермических реакций в 1,5 раза.

Одной из самых сложных научно-технических задач является интенсификация процессов теплообмена в ванне расплава в печах взвешенной плавки на штейн. В результате чего, при увеличении степени десульфурации соответствие параметров теплового режима плавки и ее технологических параметров достигается как правило, при снижении производительности печи. В использующихся современных печах взвешенной плавки на штейн удельная производительность в зависимости от состава сырья может меняться в диапазоне порядка 4,5...15 т/(м²·сутки), примерно, как и в отражательных печах.

Иногда при снижении производительности агрегата для отдельных шихтовых материалов, это может сказаться на ухудшении его теплового баланса. В таких случаях требуется сжигание в печи традиционных видов топлива, чтобы не допустить ухудшение теплового баланса в процессе. Так же в отстойнике могут быть расположены электроды, позволяющие проводить электрический обогрев ванны, вместе с тем сделать более интенсивными в ней процессы тепло- и массопереноса.

В печах для плавки в жидкой ванне интенсивность процессов теплообмена в зоне технологического процесса значительно выше, если рассматривать, например, как в газовой среде. Кроме того, процессы, которые происходят в ванне, могут быть управляемые, если изменять параметр продувки. Поэтому именно такие печи позволяют получать высокую удельную производительность при широком диапазоне при регулировании концентрации меди в штейне.

По итогу можно сказать, что анализ тепловой работы печи на основе использования балансовых уравнений, дает возможность оценить усредненные значения параметров интенсивности процессов теплообмена и теплогенерации при использовании автогенной плавки сульфидных материалов, но в тоже время, не дает нам ясно понять, как достигаются они в конкретных технологических процессах. В современных реалиях подбор основных показателей плавки и конструкции для печей делается, исходя из данных экспериментальных условий.

1.2.3. Проблемы работы энерготехнологических комплексов плавки в жидкой ванне (печах Ванюкова)

Сущность процесса плавки в жидкой ванне заключается в том, что кислородсодержащий газ вводится под избыточным давлением порядка 0,1 МПа в расплав через фурмы, находящиеся в стенах печи на уровне примерно 0,3...0,7 м ниже уровня расплава в спокойном состоянии внутри шахты печи.

Общая глубина ванны расплава в печи без барботажа может достигать значений в 2,0...2,5 м. Кислородсодержащий газ дутья при барботаже верхней части расплава, энергично перемешивает его и создает некий газонасыщенный слой гетерогенного расплава. Слой гетерогенного расплава имеет состав из шлака с включениями до 10 % от всей массы сульфидов в виде капель штейна и при недостатке тепла угля или кокса. Высота барботируемого газонасыщенного расплава увеличивается на величину, которая равняется двух-трех кратному расстоянию от оси фурм до границы расплава в спокойном состоянии. Кислородсодержащий газ в большей степени взаимодействует с сульфидом железа, углем и серой, благодаря чему у него получается равномерно генерировать тепло в верхнем слое, которое необходимо для плавления шихты, которая загружается и подогрева расплава в зоне технологического процесса.

В результате интенсивного перемешивания, капли, которые выходят из сульфидной фазы сталкиваются и смешиваются, благодаря чему достигают гидродинамически устойчивых размеров порядка 0,5...5 мм, такого размера хватает, чтобы эти капли выпали из верхнего барботажного слоя, спускаясь в нижнюю фазу.

Благодаря тому, что шихту, которая состоит из флотационного концентрата, а также бывают случаи, когда это делается с кусовым углем, вводят сверху в слой барботирования и она достаточно равномерно располагается по всему его объему.

В результате довольно высокой активности железа и серы расплавленные сульфиды шихты интенсивно взаимодействуют со шлаком и кислородом дутья, тем самым способствуя низкому содержанию магнетита в шлаке. Это благоприятно сказывается на получении шлаков, бедных по цветным металлам. При интенсивном перемешивании тугоплавкие элементы шихты быстро растворяются и, следовательно, во всем расплаве все время будет поддерживаться оптимальный состав лака, позволяющий минимизировать

потери компонентов цветных металлов. Благодаря барботирующему газу в расплаве происходит быстрая и полная возгонка летучих компонентов.

Если переточный канал для удаления шлака будет располагаться на 1 м ниже уровня фурм, то это может повлиять на время процесса и составит порядка 1,5...3,0 ч и приведет к тому, что образовавшийся шлак из верхнего барботируемого слоя будет двигаться сверху вниз. При этом он постоянно будет промываться крупными каплями штейна, которые выпадают с верхнего перемешиваемого слоя. Когда движущийся поток шлака становится ниже фурм, то перестает процесс перемешивания и из-за этого могут создаваться нужные градиенты температуры, состава и других параметров, которые благоприятно способствуют доизвлечению из шлака остающихся в нем ценных компонентов. Исходя из такого его движения, полностью исключается возможность проскока и быстрого выхода из печи необработанного шлака с повышенной концентрацией цветных металлов. Сульфидная донная фаза образовывается на дне печи из падающих капель на поверхность и удаляется отдельно от шлака из плавильного агрегата.

Процесс плавки сульфидного сырья, содержащего тяжелые цветные металлы, в жидкой ванне еще ее принято называть плавкой Ванюкова, получил широкое распространение в современной промышленности. Это связано, с рядом многих его достоинств. К их числу можно отнести: возможность плавки как флотационных концентратов, так и кусковых материалов; переработки вторичного сырья; довольно высокая удельная производительность печи; низкий пылевынос, который составляет порядка 1...2 % от всей массы шихты; широкий спектр единичной мощности (от десятков до тысяч тон шихты в сутки). На сегодняшний день достаточно хорошо проработаны физико-химические основы плавки Ванюкова, созданы физические и математические модели, которые помогают в изучении материальных и тепловых балансов, гидроаэродинамики и теплообмена в барботажной ванне. Стоит учитывать, что на данный момент недостаточная изученность тепловых процессов в энерготехнологических комплексах плавки Ванюкова (ЭТК ПВ) не дает разработать рациональные

конструкцию и компоновку элементов комплекса, где требуется учесть взаимное влияние на значения теплообмена. В частности, одним из наиболее узким местом в работе ЭТК ПВ является утилизация теплоты отходящих газов. Поэтому котлы-утилизаторы, которые используются в существующих ЭТК ПВ работают нестабильно, чем самым дестабилизируя работу всего комплекса как единое целое. Так, для того чтобы обеспечить эффективную и надежную работу ЭТК ПВ, создания средств и методов управления процессом плавки требуется знание теплофизических особенностей прорабатываемых процессов, которые будут протекать как в ванне расплава и в надслоевом (газовом) пространстве печи Ванюкова, так и рабочем объеме котла-утилизатора.

Так, например, основной из причин по которой может выходить из строя котел-утилизатор заключается в загрязнении их поверхностей нагрева технологическими уносами. Загрязнение поверхностей нагрева уносами, происходит из-за несоответствия разработанных на основе принципов энергетического котлостроения конструкций котлов-утилизаторов, условиям работы на отходящих из ПВ агрессивных, высокотемпературных запыленных газов. Именно поэтому одной из актуальных задач на сегодняшний день является совершенствование конструкций котлов-утилизаторов на основе исследования теплообмена в ЭТК ПВ.

1.3. Котлы-утилизаторы для агрегатов цветной металлургии

Котлы-утилизаторы как правило используются для того, чтобы утилизировать внешние тепловые отходы различных теплотехнических установок, которые частично используются или не используются для регенерации технологического процесса.

Одной из отличительных особенностей котлов-утилизаторов заключается в том, что в них не предусмотрены топочные устройства, где происходит сжигание топлива, кроме тех случаев, когда работа происходит от выходящих

газах, которая может содержать физическое и химическое тепло, предоставленное в виде горючих элементов и дальнейшего их дожига.

Использование тепловых отходов на производствах в котлах-утилизаторах дает возможность получить дополнительные продукты в виде тепловой энергии, пара, горячей воды и других ВЭР, что может привести к значительной экономии топлива, тем самым благоприятно сказаться на финансовую составляющую производственного учреждения.

Тепловыми отходами или как их еще называют ВЭР на производстве являются: физическая теплота отходящих газов, теплота шлаковых отходов, теплота технологической продукции, теплота рабочих тел систем принудительного охлаждения технологических камер.

Если рассматривать котел-утилизатор в виде как дополнительное теплоиспользующее устройство в агрегате, то котел-утилизатор в большинстве своем не будет оказывать какого-либо влияния на характер основного процесса. Но бывает и такое, когда котел-утилизатор способен положительно воздействовать на работу агрегата. Например, если расположить котел-утилизатор за мартеновской печью, то это даст нам возможность установить дымосос на охлажденных уходящих газах, что положительно окажет влияние на работе печи, улучшив ее тягу.

Котлы-утилизаторы классифицируются:

- 1) по типу теплообмена в КУ (радиационные, радиационно-конвективные и конвективные);
- 2) по конструктивному выполнению (газотрубные и водотрубные);
- 3) по компоновке и конструктивным особенностям газотрубных КУ (горизонтальные, горизонтальные с барабаном-сепаратором, вертикальные с барабаном-сепаратором);
- 4) по принципу циркуляции воды (с естественной, принудительной и комбинированной циркуляцией и прямоточные);

- 5) по виду сжигаемого и охлаждаемого технологического материала (например, сжиганию сероводородных газов, газов переработки нефти, загрязненных стоков, охлаждению конвертерных газов и др.);
- 6) по сделанной компоновке газоходов (П – образные, Г – образные, Т – образные, Л – образные, У – образные, башенные, горизонтальные и др.);
- 7) по выполненному типу установки (открытая, полукрытая, закрытая);
- 8) по способу организации тяги (уравновешенная, под разрежением, с наддувом);
- 9) по исполнению (для сейсмических и несейсмических районов);
- 10) по степени освоения в производстве (головные, опытно-промышленные, серийные);
- 11) по типу крепления поверхностей нагрева.

Исходя из особенной греющего теплоносителя, а именно от источника производимого ВЭР уже будут определяться конструкции и режимы работы котлов-утилизаторов, которые будут использоваться на производстве. Мы выяснили что КУ имеют огромное разнообразие, но в зависимости от главного параметра – начальной температуры греющего пара, КУ делятся на две основные группы:

- низкотемпературные котлы-утилизаторы у которых начальная температура теплоносителя $T_{\Gamma} < 1100 \dots 1200 \text{ K}$;
- высокотемпературные котлы-утилизаторы у которой начальная температура теплоносителя $T_{\Gamma} > 1400 \dots 1500 \text{ K}$.

Передача теплоты, которая происходит между поверхностями нагрева в высокотемпературных КУ, осуществляется за счет радиации, а вот в низкотемпературных КУ передача теплоты будет проходить за счет конвекции.

Существует еще одно разделение КУ, где они делятся по параметрам получаемого пара на низкие P – до 1,5 МПа, $T_{\text{п.п.}}$ – до 600 К и высокие $P > 4,5$ МПа, $T_{\text{п.п.}} > 725 \text{ K}$.

Уходящие газы, которые выделяются после теплотехнических процессов содержат в своем составе агрессивные газообразные составляющие, которые представляют собой (SO_2 , SO_3 , HF и др.), горючие газы (CO , H_2 и др.), и унос в твердом или жидком состоянии, что в дальнейшем скажется на выборе конструкции КУ и его режимных параметров.

Далее рассмотрим несколько конструкций КУ.

Газотрубные КУ

Первыми рассмотрим КУ, которые хорошо зарекомендовали себя во многих отраслях отечественного производства. Продукты сгорания в таких КУ проходят по трубам, которые располагаются в водяном объеме барабана. Такие котлы имеют несколько преимуществ, а именно: не требуют специальной обмуровки, отличаются высокой газоплотностью, простотой в изготовлении, монтажа, обслуживания, а также пониженными требованиями к питательной воде.

А вот если уже говорить про недостатки такого типа КУ, то в первую очередь сюда относят низкий коэффициент использования теплоты газов, выходящих из технологических установок, который располагается в диапазоне 50...60 %, а также высоким удельным расходом металла на выработку пара, который может достигать значения в 8 кг/(кг·ч). Также к недостаткам относят низкий предел давления вырабатываемого пара, который составляет не более 1,5...2,0 МПа. из-за присутствия барабана довольно большого диаметра, а также ограниченный проход отходящих газов, который составляет не более 30...40 тыс. м³/ч. На производстве часто используют очистку труб, это требуется для того, чтобы внутренние поверхности газотрубных котлов не заносились уносом. Газотрубные котлы рационально использовать для агрегатов малой мощности, особенно в тех случаях, когда греющие газы с повышенным давлением или содержат в своем составе токсичные компоненты.

Существует две группы на которые делятся газотрубные КУ – это вертикальные и горизонтальные. Ниже приведены основные теплотехнические

и конструктивные характеристики, характерные для одно- и двухбарабанных газотрубных КУ.

Так, к группе газотрубных горизонтальных однобарабанных КУ относят агрегаты типов Г-250, Г-250П, Г-550П и другие, предназначением которых является выработка насыщенного, а также перегретого пара за счет теплоты технологических газов, но второй вариант возможен только при том условии, что у нас будет установлен пароперегреватель.

На рисунке 1.4, представленном ниже, изображен котел-утилизатор типа Г-250, имеющий в своей конструкции пароперегреватель, в котором площадь испарительной поверхности нагрева котла равняется 250 м^2 . Изначально, отходящие газы поступают во входную камеру, затем идут по трубам пароперегревателя и испарителя, а после выходят через выходную камеру, находящуюся с обратной стороны котла-утилизатора. Поверхность испарительного нагрева выполнена из труб диаметром 50 мм и толщиной стенки 3 мм. В КУ так же присутствует барабан, где в верхней части находится сепарационное устройство, представляющее из себя пароприемный короб и дырчатые листы.

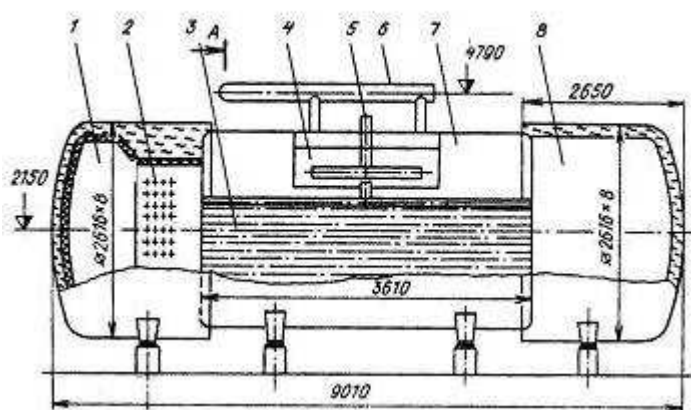


Рисунок 1.4 – Котел-утилизатор Г-250:

1 – входная камера; 2 – трубы пароперегревателя; 3 – трубы испарителя; 4 – сепарационное устройство; 5 – подвод воды; 6 – паровой коллектор, 7 – барабан; 8 – выходная камера

Котлы-утилизаторы в коксохимической промышленности

Большую роль играет использование физического тепла раскаленного кокса при его сухом тушении, так как общая экономия условного топлива будет составлять 110 тысяч тонн на каждый 1 миллион тонн произведенного чугуна.

Установка сухого тушения кокса (рисунок 1.5) состоит из нескольких основных частей, а именно: тушильной камеры и котла-утилизатора. Раскалённый кокс с большими температурами порядка 1000...1100 °С, с помощью подъемника загружается в тушильную камеру через загрузочное отверстие в бункере.

Верхняя часть бункера нужна для форкамеры, то есть аккумулятора горячего кокса. Накопление кокса в форкамере требуется, чтобы обеспечивать непрерывную работу установки, это происходит за счет периодической подачи кокса. Так, форкамера предназначена на прием раскаленного кокса от одной печи. Инертный газ продувается вверх через загруженный в бункер раскаленный кокс, который нагревается до 800 °С. Далее, нагретые инертные газы с мелкодисперсными частицами кокса подаются в котел-утилизатор через так называемый пылеулавливающий бункер. Эти газы будут последовательно омывают пароперегреватель, затем секции поверхностей испарительного нагрева с многократной принудительной циркуляцией, а также экономайзер. На производствах для утилизации теплоты могут быть использованы котлы-утилизаторы типа КСТ-80, где подвод тепла осуществляется с верхним подводом инертных газов, паропроизводительностью 25 т/ч пара, давлением 4 МПа и температурой 450 °С. После прохода через экономайзер температура уходящих газов будет 160 °С.

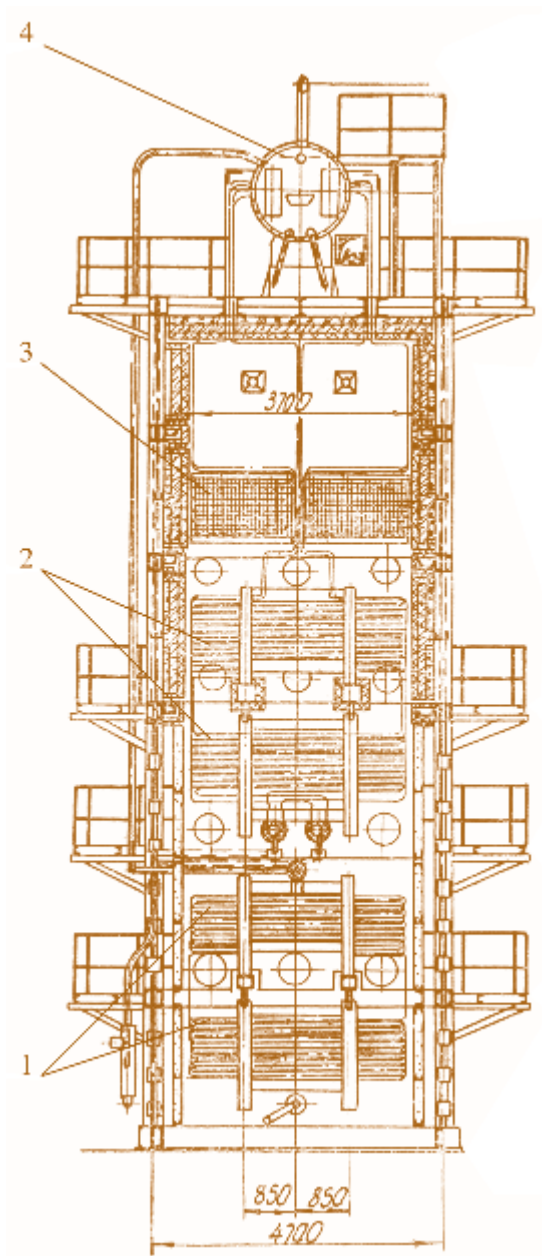


Рисунок 1.5 – Котел-утилизатор типа КСТ-80:

- 1 – экономайзер; 2 – испарительные поверхности нагрева; 3 – пароперегреватель;
4 – барабан котла

Туннельные КУ

В цветной металлургии значение КУ определяется не только обеспечиваемой ими экономией топлива, но прежде всего их положительным влиянием на основной технологический процесс. В многих случаях, например, при кислородно-взвешенной плавке или в шлаковозгоночных печах, основной

технологический процесс постоянно находится в прямой зависимости от работоспособности котла на отходящих продуктах сгорания.

В комплексах цветной металлургии одними из наиболее часто используемых являются радиационно-конвективные котлы (РКК). В прочем, и некоторые котлы такого типа оказались неработоспособны, к примеру к ним можно отнести котлы, которые находятся за отражательными печами (четырёх- и трёхбарабанные котлы ЛМЗ ТП-50), а также специально сделанные котлы типа УКЦМ (утилизационные котлы цветной металлургии). Это случилось в следствии того, что в этих котлах не были учтены специфические особенности уходящих газов печей цветной металлургии, а именно к ним относились: мелкодисперсность и легкоплавкость значительной части шихтового выноса, высокая запыленность и высокое содержание SO_2 . В результате чего, такие котлы требовалось останавливать и прочищать, так как они очень быстро заносились уносом.

После чего в начале 70-х годов, были разработаны туннельные котлы серии ТОП (туннельные котлы за отражательными печами) имеющие разные типоразмеры (50/40, 25/40), в которых уже были учтены специфические особенности уходящих газов в печах, которые не учитывались в предыдущих конструкциях.

На рисунке 1.6 представлена схема туннельного котла, работающего на отходящих газах, который располагается за печами кислородно-факельной плавки типа ТФП. Туннельный КУ включает в себя экранированную радиационную камеру, за которой находятся испарительные ширмы. Такие котлы такого типа как ТФП были разработаны двух типоразмеров 15/50 и 25/50 и требуются для выработки перегретого пара давлением 5,0 МПа и температурой 625 К на производительность 15 и 25 т/ч.

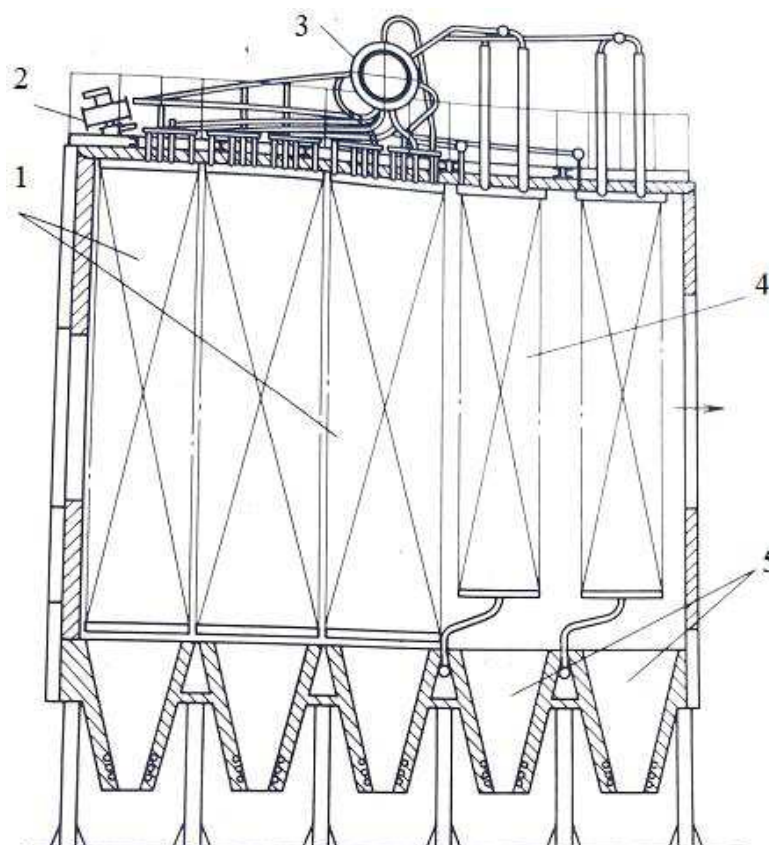


Рисунок 1.6 – Туннельный котел типа ТФП:

1 – экраны радиационной камеры; 2 – растопочная горелка; 3 – барабан; 4 – испарительные ширмы; 5 – бункер

Радиационная камера охлаждения выглядит как вытянутый в длину газоход прямоугольного сечения, где все грани экранированы радиационными поверхностями. После радиационной камерой находится конвективная ширмовая поверхность нагрева. В нижней части котла расположены водоохлаждаемые бункера, которые сделаны из стальных листов, к наружной поверхности которых прикреплены охлаждаемые трубы, включенные в контур циркуляции котла, это сделано для того, чтобы была возможность предотвратить сернокислотную коррозию стенок в бункерах. В котлах ТФП отсутствует воздухоподогреватель, так как в кислородно-факельном процессе применяют только технический кислород. По экранному и конвективному газоходам происходит движение газов с малой скоростью (0,5...1,0 м/с).

При модернизации котла была изменена конструкция воронки топки и предусмотрены специальные устройства, которые способны предотвратить подсосы воздуха и меры, направленные на обеспечение более тщательного регулирования температуры газов за котлом в зависимости от тех условий, которые требуются для очистки и использования печных газов.

1.4. Постановка задач работы

Анализ литературных источников показал, что одним из наиболее уязвимых мест в работе ЭТК ПВ являются установки, в которых происходит утилизация теплоты отходящих газов. Поэтому котлы-утилизаторы, которые используются в ЭТК ПВ в большинстве своем работают неустойчиво, что в дальнейшем сказывается на работе комплекса в целом резко снижая продолжительность их кампании. Так, например, основной причиной по которой может выходить из строя котел-утилизатор заключается в загрязнении их поверхностей нагрева технологическими уносами. Загрязнение поверхностей нагрева уносами, происходит из-за несоответствия разработанных на основе принципов энергетического котлостроения конструкций КУ, условиям работы на отходящих из ПВ агрессивных, высокотемпературных запыленных газов. Именно поэтому одной из актуальных задач является совершенствование конструкций котлов-утилизаторов на основе исследования теплообмена в ЭТК ПВ.

Цель исследования – оптимизация работы энерготехнологического комплекса автогенной плавки в жидкой ванне (ЭТК ПВ).

Задачи бакалаврской работы:

1. Изучить особенности конструкции и тепловой работы агрегатов и элементов энерготехнологических комплексов плавки цветных металлов.
2. Установить особенности конструкции и проблемы его надежной работы ЭТК ПВ.

3. Провести выбор рациональной конструкции КУ для ЭТК ПВ.
4. Провести теплотехнический расчет выбранной конструкции КУ.
5. Разработать рекомендации для повышения надежности и эффективности работы ЭТК ПВ.

2. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ПЕЧЬ ВАНЮКОВА– КОТЕЛ-УТИЛИЗАТОР» (ЭТК ПВ)

2.1. Особенности конструкции и теплообмена в ЭТК ПВ

Оборудование комплекса плавильного агрегата, которое используется для плавки в жидкой ванне, рассмотрим на примере опытно-промышленной печи ПЖВ-20. Печь состоит из таких компонентов как: узла загрузки шихты; плавильного агрегата с газоходной системой; копильника (миксера) отвального шлака; копильника штейна; оборудования, которое требуется для транспортировки расплавов (штейна и шлака); систем для подачи в печь воздуха, технического кислорода, природного газа, а также воды для охлаждения кессонированных элементов.

На рисунке 2.1 приведена схема цепи аппаратов комплекса ПЖВ-20.

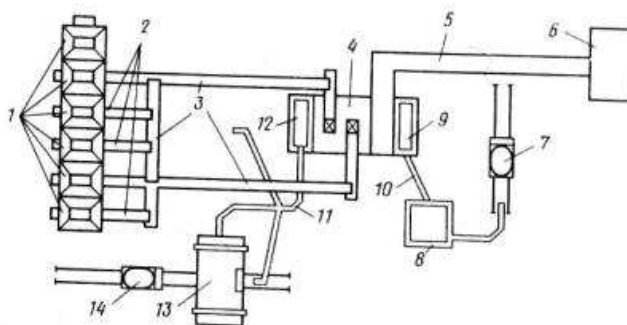


Рисунок 2.1 – Схема цепи аппаратов комплекса ПЖВ-20:

1 – шихтовые бункера; 2 – ленточные питатели; 3 – транспортеры; 4 – печь ПЖВ-20; 5 – газоход с пылевой камерой; 6 – сборный боров отражательного отделения; 7 – шлаковоз; 8 – копильник шлака; 9 – шлаковый сифон; 10 – шлаковый желоб; 11 – штейновый желоб; 12 – штейновый сифон; 13 – копильник штейна; 14 – штейновая тележка

В комплексе печи в жидкой ванне, все начинается с того, что из шихтового бункера компоненты шихты подаются по транспортерному тракту в бункера

печи, в которых находятся ленточные питатели, для их транспортировки. Привод ленточных питателей оснащен электродвигателями постоянного тока с частотой вращения от 2 до 20 с⁻¹, что позволяет загружать шихту со скоростью 12...48 т/ч.

Чтобы обеспечивать плавку шихты на производстве нужного состава, загрузка шихты в печь происходит по двум независимым транспортерным цепочкам, так если это требуется, то печь работает по 6...8 часов по одной цепочке. Далее, через две сводовые тчки шихта, приходящая с транспортеров, загружается в печь.

В комплексе также имеются бункера с питателями, в которых компоненты шихты загружают в чистом виде, эти приспособления требуются для оперативного управления для изменения состава шихты.

Печь ПЖВ-20 (рисунок 2.2) представляет собой прямоугольную шахту с размерами 2,3 м в ширину, 10 м в длину и высотой 6,5 м; площадь сечения шахты в области фурм 23 м². К горну с торцевых сторон примыкают соединенные с ним штейновый и шлаковый сифоны. В случае аварийного выпуска шлака и штейна в печи находятся шпурсы. Фундамент печи является ленточным, железобетонным. Каркас горна печи является металлическим, самонесущим.

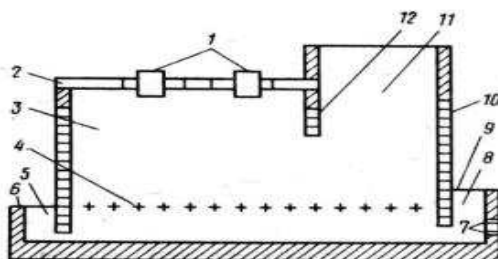


Рисунок 2.2 – Продольный разрез печи ПЖВ-20:

- 1 – загрузочные отверстия; 2 – свод; 3 – шахта печи; 4 – фурмы; 5 – штейновый сифон; 6 – подина; 7 – шпурсы для скоростного выпуска расплава;
- 8 – шлаковый сифон; 9 – сливной порог шлакового сифона; 10 – торцевые стенки кессонированного пояса; 11 – аптейк; 12 – перегородка

Под печи и сифонов сделан из нескольких рядов хромомагнетитового кирпича на шамотной засыпке. Кладка стен горна печи и сифонов сделана также,

как и под печи и сифонов из хромомagneзитового кирпича, а вот уже на уровне 900 мм от подины в кладке стен горна печи и шлакового сифона применены закладные кессоны из прямоугольных медных цельнотянутых глассажных труб имеющими различную конфигурацию.

Шахта печи сделана из кессонированного пояса с высотой 3900 мм, которая состоит из трех рядов кессонов специальной конструкции, обеспечивающая теплосъем не менее чем $25,1 \times 10^5$ кДж/(м²·ч). Торцы печи до уровня третьего ряда кессонов набраны из глассажных медных труб 65×65 мм с отверстием диаметра 25 мм.

Кессоны печи ПЖВ-20 делаются в виде прямоугольной плиты 600×1300 мм, с толщиной порядка 80...100 мм, где они соединяются в секции, и каждая такая секция оборудована общей рамой. Все смежные секции скрепляют между собой обоим направлениях и крепко связывают с несущим каркасом.

Кессоны подразделяются на два вида: фурменные и рядовые. Они практически идентичные, за исключением того, что рядовой отличается от фурменного, тем что у него отсутствует гнездо для установки фурменного патрубка.

Так же кессоны могут быть нескольких видов: литые из электролитной меди с залитыми медными змеевиками и из прокатных плит, имеющих различную толщину. Кессон фурменный печи ПЖВ-20 состоит из: плиты, заглушки, штуцера, кольца, фурменного гнезда, паза для удержания гарнисажа и водяного канала. Несмотря на то, что в таких кессонах есть некоторые усложнения технологии изготовления, например, такие как сверловка каналов и обварка заглушек, а также их большие капиталовложения, все равно такие кессоны являются наиболее надежными и долговечными.

По нижнему ряду кессонированного пояса с обеих сторон печи находятся водоохлаждаемые фурмы, сделанные из кованой меди. Благодаря фурмам с такой конструкцией, можно подавать в расплав как воздушно-кислородную смесь, так и сырой природный газ, а в некоторых случаях если это понадобится,

то можно и отключить дутье без заливки фурменного канала расплавом. В подфурменной зоне фурмы расположены над подиной на высоте 1665 мм, это требуется для полноты разделения шлака и штейна и следствия повышения надежности работы. Шахта печи делится на две зоны: подфурменную и надфурменную.

Свод печи делается съемным, кессонированным, в котором присутствует отверстие для загрузочных течек. Именно таким же способом делаются и своды штейнового и шлакового сифонов.

В зависимости от того, какие установки используются, могут использоваться аварийные шпурсы шлакового сифона, которые располагаются на разных уровнях от пода печи.

Отходящие газы, выходящие из печи поднимаются по газопроводу прямоугольного сечения, который обязательно должен быть сделан из огнеупорного кирпича.

Для уменьшения пылевыноса в шахте печи при входе в газопровод используют водоохлаждаемую перегородку из глиссажных труб, которая делается на своде печи.

К аптейку присоединена кессонированная пылевая камера, где брызги расплава и пыль, уносимые газовым потоком меняют свою температуру в меньшую сторону, закаливаются и улавливаются. Из пылевой камеры, газы которые отходят по газоходу отводятся в общий боров. Для того, чтобы регулировать разрежение на выходе из печи в газоходе обычно устанавливается дроссельная заслонка.

Из-за резкого падения скорости газового потока в пылевой камере, более крупные частицы пыли будут осаждаться в бункере камеры и выгружаться с некой периодичностью шнеком в оборотный пылевой бункер. Обычно бункеры газоходы чистят с периодичностью раз в трое суток. Пыль выгружают в кубели и переводят в оборотный пылевой бункер, где при заполнении его разгружается через пылевой затвор в шихтовое отделение.

Штейн, который будет получаться из печи ПЖВ-20 будет с некой периодичностью удаляться через штейновый сифон и по обогреваемому желобу с помощью газовых горелок будет поступать в копильник штейна (миксер), откуда по мере заполнения он будет поступать в шлаковые ковши.

Штейновые тележки применяются на производстве для того, чтобы транспортировать штейн в ковшах. И штейн, отправленный в главный пролет мостовым краном, далее заливается в конвертер для дальнейшей продувки на черновую медь.

Кожух миксера для штейна, представляет собой стальной сосуд цилиндрической формы, в котором имеются отверстия для горловины и два осевых отверстия для заливочного желоба и горелочного устройства. Миксер облицован огнеупорным хромомagneзитовым кирпичом и обогревается с помощью газоздушнoй горелки, в которой расход природного газа составляет порядка 100 – 150 м³/ч. Привод миксера и поворотное устройство выполнены также, как и у обычного горизонтального конвертера.

Для того чтобы удалять топочные газы над горловиной миксера в месте слива располагается зонт, который соединен с вытяжной системой вентиляции. Газы через свечу выбрасываются в атмосферу.

Шлак, получаемый из печи ПЖВ-20, удаляется через шлаковый сифон и по обогреваемому желобу поступает в копильник шлака, где он будет накапливаться и с некой периодичностью выпускаться в шлаковые чаши для дальнейшей их транспортировки. Вместимость чаши 16,5 м³, где масса шлака может достигать порядка 37,5 т. Далее уже тепловозами шлаковозы транспортируются к месту слива на шлаковый отвал. Учитывая то, что шлаковый копильник может работать и как отстойник, поэтому два раза в неделю из него через специально шпуровое устройство выпускают порядка 10–12 т штейна того же самого состава, какой находится и в плавильной зоне печи. После штейн сливается в пруд оборотных материалов и в холодном виде загружается для переработки в конвертеры.

Копильник шлака представляет собой прямоугольную емкость полезным объемом 25 м². Фундамент копильника является столбчатым сделанный из металлического каркаса. Подина выложена из трех рядов огнеупорного кирпича, стены же в свою очередь делаются из хромомagneзитового кирпича с водоохлаждаемыми медными кессонами на уровне расплава.

На передней торцевой стенке находятся три газоздушные горелки, которые имеют расход газа порядка 120...150 м³/ч. На задней торцевой стенке находится окно для ввода переточного желоба, именно по нему и поступает шлак из печи. В боковой стенке располагается медная литая кессонированная втулка, требуемая для выпуска шлака и шпур. Свод копильника подвесной и сделан из хромомagneзитовых блоков толщиной 460 мм. Топочные газы от копильника затем идут по аптейку с диаметром 1020 мм, который выполнен из футерованного шамотного кирпича, а также снабженному дроссельной заслонкой, которая понадобится для регулирования тяги в аптейке.

В печи ПЖВ-20 применяется газовое оборудование, которое необходимо для подачи природного газа через газовые горелки в плавильную зону печи и обогрева вспомогательных устройств, расположенных в печи.

Природный газ по главному газопроводу подается под давлением порядка 0,6...0,8 МПа на газорегуляторный пункт, в котором происходит снижение давления до показателей 0,335...0,340 МПа и после этого из общецехового коллектора природный газ будет поступать на газорегулирующую установку печи ПЖВ-20, откуда природный газ будет подаваться сразу в две системы: отопление и плавку.

Из коллектора конвертерного отделения будет поступать технологический воздух со значениями давления порядка 0,31...0,34 МПа в печь ПЖВ-20. В схеме цепи аппарата комплекса ПЖВ-20 также имеется воздухопровод, который может обеспечить расход воздуха до 15 тыс. м³/ч. Для обогащения дутья такой печи требуется применение технологического кислорода составом 92...95 %, поступающий на узел смешения с воздухом, расположенный после

кислородорегулирующей установки. Давление кислорода перед узлом смешения должно быть на 0,02 МПа выше давления технологического воздуха. Практически после регулирующего клапана давление кислорода поддерживается на уровне 0,34...0,36 МПа.

Для того чтобы охладить кессонированные элементы печи ПЖВ-20, требуется использование технической воды, взятой из системы оборотного водоснабжения завода. Расход воды на печь при давлении 0,8...1,0 МПа составляет порядка 600...700 м³/ч.

Отметим, что энерготехнологический комплекс ЭТК ПВ должен включать и соответствующую технологическим требованиям конструкцию котла-утилизатора.

2.2. Выбор конструкции котла-утилизатора

При выборе наиболее рациональной конструкции котла-утилизатора, выбор пал на котел-утилизатор типа РКК-20, так как именно эта конструкция хорошо зарекомендовала себя при наших температурах и составе газа.

Котел-утилизатор РКК-20/40, разработанный отечественной компанией Центроэнергоцветметом, предназначается для установки за конвертерами медно-никелевого передела и медеплавильными печами, показан на рисунках 2.3 и 2.4, а его конструктивные характеристики приведены в таблицах 2.1 и 2.2. Котел горизонтального типа, однобарабанный, с многократной принудительной циркуляцией.

Котел-утилизатор РКК-20/40 предназначен для производства насыщенного пара давлением до 4 МПа, температурой 249 °С, расходом 4,3 кг/с собственными поверхностями нагрева и 6,4 кг/с поверхностям предвключенного напыльника.

Технологические газы, которые уже прошли через напыльник испарительного охлаждения с температурой до 850 °С через входное окно

фронтального экрана идут в котел. Котел-утилизатор имеет достаточно большой барабан с сепарационным устройством, радиационную камеру шириной 4850 мм и длиной 8400 мм и конвективную камеру, которая выполняется с помощью специальных газоплотных экранов. Бункер для сброса пылевыноса имеет наклон стенок к горизонту $61^{\circ}56'$ и заканчивается прямоугольным фланцем размером 13200×600 мм, к которому в зависимости от требуемой технологии производства может присоединяться шнек или скребковый транспортер для дальнейшего удаления осевшей пыли, которая может оставаться на стенках бункера.

Для того, чтобы с большей результативностью производить омывание поверхностей нагрева с помощью газов в аптечке устанавливаются две перегородки, где одна располагается перед радиационными ширмами сверху газового тракта котла, а другая располагается снизу перед конвективными ширмами газового тракта котла. Перегородка, расположенная сверху, делается из горизонтально установленных U-образных блоков, в то время как нижняя из двух трехходовых блоков и вместе с верхней перегородкой включена в самостоятельный циркуляционный контур. Коллекторы конвективных ширм делаются снаружи газохода и шарнирно соединяются с несущими балками с помощью подвесок. Несущие балки соединяются поперечными балками с образованием цепи независимых несущих рам, к которым далее подвешивают ширмы.

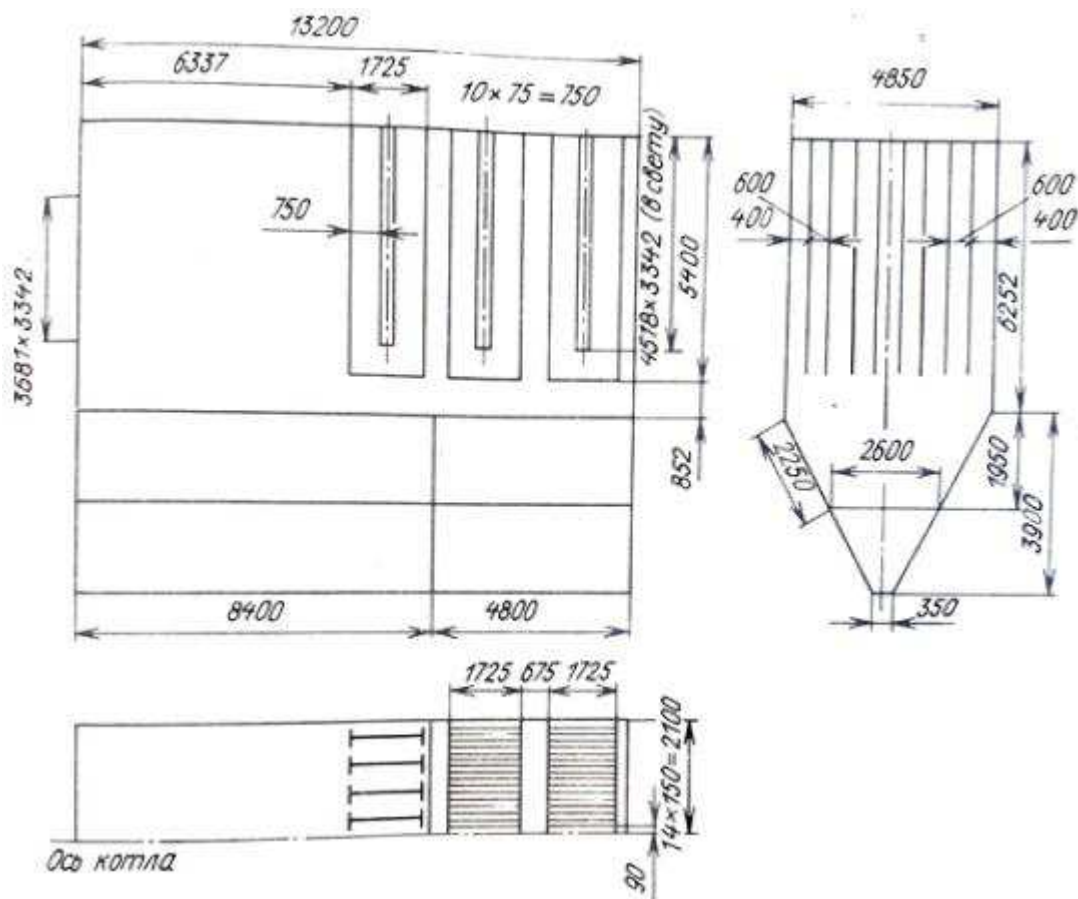


Рисунок 2.4 – Котел-утилизатор РКК-20/40 (конструктивные схемы расположения поверхностей нагрева)

Поверхности котла-утилизатора РКК-20/40 делаются из труб радиусом 19 мм, в которых толщина стенки составляет 5 мм и шагом 75 мм. Так же в процессе присутствует циркуляция воды, которая осуществляется благодаря двум насосам, один из которых является рабочий, а другой резервный.

Барaban котла с наружным диаметром составляет 1580 мм, длиной основной части 6600 мм сделан сварным швом из стали марки 20К; толщина стенки цилиндрической части составляет 40 мм.

2.3. Разработка рациональной конструкции элементов ЭТК ПВ

Схема предлагаемой компоновки печи Ванюкова и котла-утилизатора РКК-20/40 в энерготехнологический комплекс ПВ приведена на рисунке 2.5.

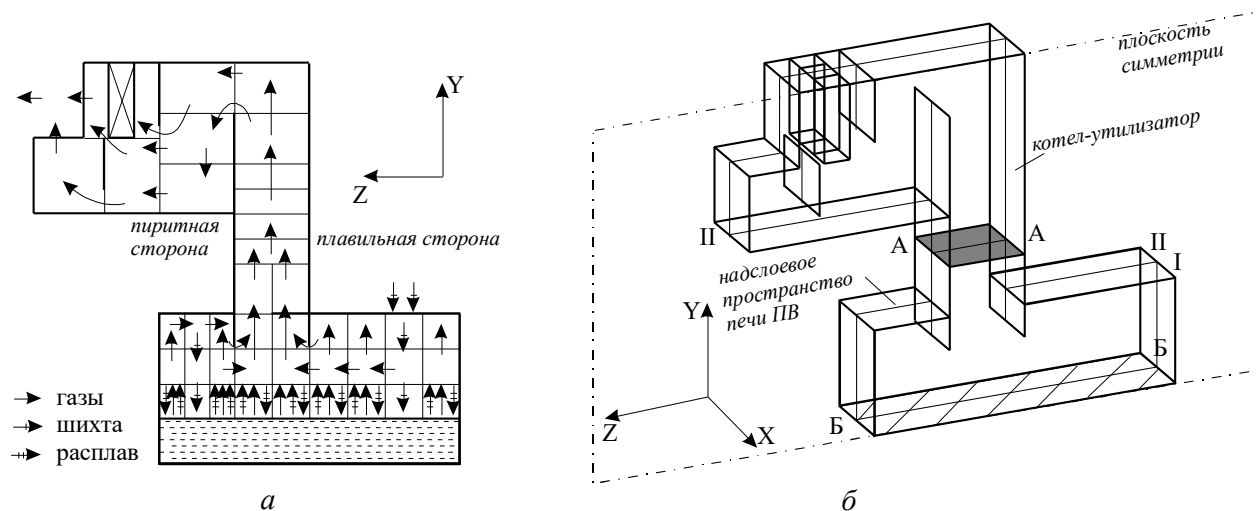


Рисунок 2.5 – Энерготехнологический комплекс ПВ

a – схема движения шихты и продуктов плавки; *б* – продольный разрез комплекса; I и II – центральные и пристенные слои в элементах комплекса; А-А – поверхность в сечении, отделяющем аптейк печи от котла-утилизатора; Б-Б – поверхность ванны расплава

Печь включает в себя кессонированные поверхности боковых стен, торцевых перегородок, отделяющих штейновый и шлаковый сифоны от плавильного пространства печи с ванной расплава, свода и аптейка. Поверхность в сечении А-А (см. рис. 2.5) отделяет аптейк от рабочего пространства КУ.

Были выделены области шихтовых потоков под загрузочными окнами на пиритной и плавильной сторонах печи. Такой способ загрузки обуславливается тем, что шихтовый поток, который будет подаваться на поверхность расплава из загрузочного окна, уменьшает пылевынос с отходящими из печи газами и можно сказать практически не будет пропускать тепловое излучение от поверхности ванны расплава на поверхность кладки надслоевого пространства и экранов котла.

При анализе тепломассообмена в ЭТК ПВ следует учитывать такой момент, что интенсивное барботирование расплава вызывает сильное брызгообразование и, в результате чего, вынос брызг из печи. Плавильный унос находится в жидком состоянии, и как следствие имеет высокую температуру и может оказать существенное влияние на показатели теплообмена в НП ПВ. Помимо этого, агрессивный плавильный унос при довольно высоких температурах способствует более быстрому износу кладки в надслоевом пространстве печи, а также загрязнению и шлакованию поверхностей нагрева КУ. Поэтому одним из важных моментов при компоновке элементов ЭТК ПВ будет являться верный учет брызгоуноса, т.е. массообмена с ванной расплава. В связи с этим установка аптейка между загрузочными окнами на пиритной и плавильной сторонах печи, соединяющего ПВ и КУ в единый комплекс в сечении А-А, способствует снижению интенсивности шлакования поверхностей экранов в радиационной камере КУ.

2.4. Выводы по главе 2

1. На примере опытно-промышленной печи плавки в жидкой ванне (печи Ванюкова) ПЖВ-20 проведен анализ особенностей ее конструкции и технологии плавки, а также специфики протекающих процессов тепло- и массообмена.

2. Произведен выбор конструкции котла-утилизатора для ЭТК ПВ. Показано, что по своим технико-экономическим характеристикам котел-утилизатор РКК-20/40, разработанный Центроэнергоцветметом, удовлетворяет технологическим требованиям медно-никелевого производства и может использоваться в качестве элемента ЭТК ПВ для охлаждения отходящих из плавильной печи технологических газов.

3. Предложена рациональная конструкция элементов ЭТК ПВ, включающая печь Ванюкова и котел-утилизатор РКК-20/40. Показано, что загрузка шихты через окна, расположенные между пиритной и плавильной

сторонами печи, уменьшает пылевынос с уходящими из печи газами и практически не пропускает тепловое излучение от поверхности ванны расплава на поверхность кладки надслоевого пространства и экранов котла.

3. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ЭТК ПВ

3.1. Теплотехнический расчет котла-утилизатора

Были произведены расчеты теплообмена в котле-утилизаторе ЭТК ПВ при его проектном режиме работы. Производительность печи на шихте составляла 19,44 кг/с, из них 15,3 кг/с подавалось через загрузочные окна на плавильной стороне. Принималось, что шихта сплошным потоком непрерывно падает на поверхность расплава и сразу же поглощается ванной. Газовыделение из расплава идет равномерно по всей поверхности ванны, за исключением только зон, которые располагаются под загрузочными окнами. Режимные параметры и схема движения продуктов плавки и массообмена между технологическими зонами (см. рис.2.5) принимались по результатам имеющихся балансовых исследований промышленной печи БГМК. Как видно, технологические газы поднимаются вертикально до зон верхнего яруса, затем устремляются к аптейку в горизонтальном направлении и входят в радиационную часть КУ. Таким образом, объем газов, циркулирующих в НП и проходящих через КУ, составил 9,72 м³/с при их запыленности 0,07 кг/м³.

Температура подаваемой шихты в расчете принималась 25 °С, воды в кессонах – 47,5 °С, расплава 1300 °С, пароводяной смеси для экранных поверхностей КУ – 104 °С, а для ширмовых поверхностей нагрева КУ – 250 °С.

Расчеты произведены на основании нормативного метода расчета котлов. Расчетно-конструктивные характеристики испарительных поверхностей котла РКК-20/40 представлены в таблицах 3.1 и 3.2. Н, Т – диаграмма для продуктов сгорания приведена на рисунке 3.1.

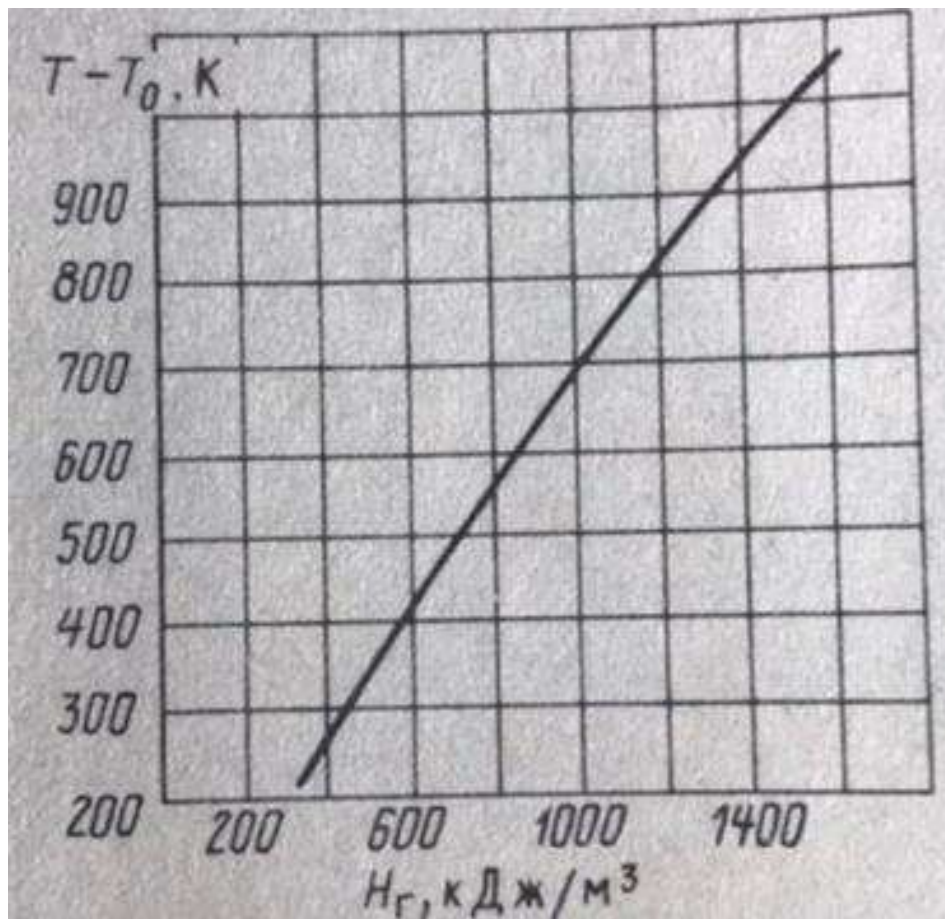


Рисунок 3.1 – H, T – диаграмма продуктов сгорания

Таблица 3.1 – Расчетно-конструктивные характеристики радиационной камеры котла РКК-20/40

Характеристика	Обозначение или расчетная формула	Расчет
Диаметр и толщина стенки труб, мм δ	$d \times \delta$	38×5
Шаг труб, мм	S	75
Площади поверхностей, м ² :		
Фронтальная стена	F_{ϕ}	37,55
Задняя стена	$F_{з}$	47,55
Боковые стены	$F_{б}$	115,4
Потолок	$F_{п}$	30,73
Под	$F_{под}$	21,85
Полная площадь поверхности стен радиационной камеры, м ²	$F_{ст} = F_{\phi} + F_{з} + F_{б} + F_{п} + F_{под}$	253,08
Площадь неэкранированной поверхности стен камеры, м ²	$F_{неэкр}$	12,3
Площадь лучевоспринимающей поверхности стен камеры, м ²	$F_{л} \equiv F_{ст} - F_{неэкр}$	$253,08 - 12,3 = 240,78$
Объем камеры до ширм, м ³	$V_{р.к}$	261,67
Степень экранирования	$\chi = \frac{F_{л}}{F_{ст}}$	$\frac{240,78}{253,08} = 0,951$
Эффективная толщина излучающего слоя, м	$s \equiv 3,6 \frac{V_{р.к}}{V_{ст}}$	$s \equiv 3,6 \frac{V_{р.к}}{V_{ст}}$

Таблица 3.2 – Расчетно-конструктивные характеристики испарительных поверхностей котла РКК-20/40

Характеристика	Обозначение или расчетная формула	Расчет		
		Испарительные ширмы радиационной камеры	Первая испарительная поверхность конвективной камеры	Вторая испарительная поверхность конвективной камеры
Диаметр и толщина стенки труб, мм	$d \times \delta$	38 × 5	38 × 5	38 × 5
Количество ширм, шт.	n	8	–	–
Число рядов труб	z	–	30; 22	30; 22
Средний шаг между ширмами (поперечный шаг), мм	S_1	600	150	150
Продольный шаг, мм	S_2	75	75	75
Относительный поперечный шаг	$\sigma_1 = \frac{S_1}{d}$	$\frac{600}{38} = 15,8$	$\frac{150}{38} = 3,95$	$\frac{150}{38} = 3,95$
Относительный продольный шаг	$\sigma_2 = \frac{S_2}{d}$	$\frac{75}{38} = 1,98$	$\frac{75}{38} = 1,98$	$\frac{75}{38} = 1,98$
Площадь поверхности нагрева ширм, м ²	$F_{ш}$	$2 \times 2 \times 0,788 \times 5,4 \times 8 = 136,3$	500	500
Дополнительная площадь поверхности в области ширм, м ²	$F_{доп}$	$2,063 \times 5,4 \times 2 + 2,063 \times 4,85 = 32,7$	59	81
Общая поверхность нагрева, м ²	$F_{общ}$	$136,3 + 32,7 = 169$	$500 + 59 = 559$	$500 + 81 = 581$
Живое сечение для прохода газов, м ²	F_r	24,55	23	17,5
Площадь лучевсприимающей поверхности, м ²	$F_{л.ш}$	34,5	–	–

Продолжение таблицы 3.2.

Характеристика	Обозначение или расчетная формула	Расчет		
		Испарительные ширмы радиационной камеры	Первая испарительная поверхность конвективной камеры	Вторая испарительная поверхность конвективной камеры
Эффективная толщина излучающего слоя, м	s	$\frac{1,8}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{C}} = \frac{1,8}{\frac{1}{0,6} + \frac{1}{5,4} + \frac{1}{1,725}} = 0,74$	$0,4 \times 0,9d \left(\frac{4}{\pi} \times \frac{S_1 \times S_2}{d^2} - 1 \right) =$ $= 0,4 \times 0,9 \times 0,038 \left(\frac{4}{3,14} \times \frac{0,15 \times 0,075}{0,038^2} - 1 \right) = 0,12$	

Таблица 3.3 – Исходные данные для расчета котла РКК-20/40

Величина	Обозначение	Значение	
Вместимость печи, т	B_k	80	55
Расход воздуха на дутье в печь, м ³	B_B	11,11	6,94
Количество уходящих газов с учетом присоса воздуха ($\alpha = 1,4$), м ³ /с	V_r	15,6	9,72
Температура газов на входе в котел, К	T_r'	1123	1123
Средний состав газов, %	$SO_2 + SO_3$	10,7	
	O_2	7,5	
	H_2O	1,4	
	N_2	80,4	
Концентрация пыли в газах, кг/м ³	$\mu_{вх}$	0,0357	
Параметры воды и пара:			
Давление в барабане	p	3,924	
Температура насыщенного пара, К	T_H	528	
Температура питательной воды, К	$T_{п.в}$	378	

Таблица 3.4 – Тепловой расчет котла РКК-20/40

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Тепловой баланс котла и определение паропроизводительности				
Температура уходящих газов, К	T'_{Γ}	По заданию	1123	1123
Энтальпия газов на входе, кДж / м ³	H'_{Γ}	По рис. 3.1	1280	1280
Температура уходящий газов, К	T_{Γ}^{yx}	Принимается с последующим уточнением	696	655
Энтальпия уходящих газов, кДж / м ³	H_{Γ}^{yx}	По рис. 3.1	608	546,4
Потери теплоты с уходящими газами, %	q_2	$H_{\Gamma}^{yx} \times \frac{100}{H'_{\Gamma}}$	$608 \times \frac{100}{1280} = 47,4$	$546,4 \times \frac{100}{1280} = 42,6$
Потери теплоты в окружающую среду, %	q_5	Принято по 9	2	3,2
Сумма потерь, %	$\sum q$	$q_2 + q_5$	$47,4 + 2 = 49,4$	$42,6 + 3,2 = 45,8$
Коэффициент использования теплоты, %	η	$100 - \sum q$	$100 - 49,4 = 50,6$	$100 - 45,8 = 54,2$
Коэффициент, учитывающий потери в окружающую среду	φ	$1 - \frac{q_5}{q_5 + \eta}$	$1 - \frac{2}{2 + 50,6} = 0,96$	$1 - \frac{3,2}{3,2 + 54,2} = 0,95$
Температура питательной воды, кДж / кг	$T_{п.в}$	Задана	378	378
Энтальпия насыщенного пара, кДж / кг	$h_{н.п}$	Принято по 9	2802	2802
Продувка, %	P	Принято	7	7
Энтальпия котловой воды, кДж / кг	$h_{к.в}$	Принято по 9	1081	1081
Энтальпия питательной воды, кДж / кг	$h_{п.в}$	Принято по 9	443,3	443,3

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Паропроизводительность котла, кг / с	D	$\frac{V_{\Gamma} H_{\Gamma} \eta}{h_{\text{н.п}} - h_{\text{п.в}} + P(h_{\text{н.п}} - h_{\text{п.в}})}$	$\frac{15,6 \times 1280 \times 0,506}{2802 - 443,3 + 0,07(1081 - 443,3)} = 4,21$	$\frac{9,72 \times 1280 \times 0,542}{2802 - 443,3 + 0,07(1081 - 443,3)} = 2,81$
Расчет радиационной камеры				
Температура газов на выходе из камеры, К	T_{Γ}''	Принимаем с последующим уточнением	933	873
Энтальпия газов на выходе из камеры, кДж / м ³	H_{Γ}''	По рис. 3.1	975,4	880,3
Объемная доля водяных паров	$r_{\text{H}_2\text{O}}$	Принято по 9	0,014	0,014
Объемная доля трехатомных газов	$r_{\text{п}}$	$r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{RO}_2}$	$0,107 + 0,014 = 0,121$	$0,107 + 0,014 = 0,121$
Коэффициент загрязнения экранов	ε	Принято по 9	0,0086	0,0086
Поглощательная способность трехатомных газов, м × кПа	$p_{\text{п}} s$	$p r_{\text{п}} s$	$0,121 \times 3,72 = 0,45$	$0,121 \times 3,72 = 0,45$
Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами, 1 / (м × кПа)	k_{Γ}	Принято по 9	0,76	0,78
Коэффициент ослабления лучей пылевыми частицами, 1 / (м × кПа)	$k_{\text{п}}$	Принято по 9	9	9,5
Концентрация пыли на выходе из камеры, кг / м ³	$\mu_{\text{вых}}$	$\mu \times 0,6$	$0,0357 \times 0,6 = 0,0215$	$0,0357 \times 0,6 = 0,0215$

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Концентрация пыли в камере, $\text{кг} / \text{м}^3$	$\mu_{\text{к}}$	$\frac{\mu_{\text{вх}} + \mu_{\text{вых}}}{2}$	$\frac{0,0357 + 0,0215}{2} = 0,029$	$\frac{0,0357 + 0,0215}{2} = 0,029$
Плотность газа, $\text{кг} / \text{м}^3$	ρ_{Γ}	$\rho_{\text{SO}_2} \text{SO}_2 + \rho_{\text{O}_2} \text{O}_2 + \rho_{\text{H}_2\text{O}} \text{H}_2\text{O} + \rho_{\text{N}_2} \text{N}_2$	$2,858 \times 0,107 + 1,428 \times 0,075 + 0,804 \times 0,014 + 1,251 \times 0,804 = 1,42$	
Концентрация пыли в газах, $\text{кг} / \text{кг}$	μ_{Γ}	$\frac{\mu}{\rho_{\Gamma}}$	$\frac{0,029}{1,42} = 0,0202$	0,0202
Оптическая толщина потока	$k_{\text{рs}}$	$(k_{\Gamma} r_{\text{п}} + \mu k_{\text{п}}) s$	$(0,76 \times 0,121 + 0,0202 \times 9) \times 3,72 = 1$	1,04
Интегральный коэффициент теплового излучения факела	$\alpha_{\text{ф}}$	По [9]	0,635	0,645
Физическая поглощательная способность экранов	$\alpha_{\text{ф}}^{\text{ЭК}}$	По [9]	0,75	0,75
Поглощательная способность экранов	$\alpha_{\text{л}}^{\text{ЭК}}$	По [9]	0,7	0,77
Приведенный интегральный коэффициент теплового излучения камеры [22]	$\alpha_{\text{к}}$	$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{л}}^{\text{ЭК}}} + \chi(\frac{1}{\alpha_{\text{ф}}} - 1)}$	$\frac{1}{\frac{1}{0,7} + 0,952(\frac{1}{0,635} - 1)} = 0,542$	0,548
Теплота, переданная излучением, $\text{кДж} / \text{м}^3$	$Q_{\text{р.к}}^{\text{л}}$	$\varphi(H'_{\Gamma} - H''_{\Gamma})$	$0,96(1280 - 975,4) = 294,4$	$0,95(1280 - 880,3) = 381,8$
Температура загрязненной стенки, К	T_3	$T_{\text{н}} + \varepsilon \frac{V_{\Gamma} Q_{\text{р.к}}^{\text{л}}}{F_{\text{л}}}$	$522 + 0,0086 \frac{15,6 \times 294,4 \times 10^3}{245,78} = 682$	652
Безразмерная температура	θ_3	$\frac{T_3}{T'_{\Gamma}}$	$\frac{682}{1123} = 0,608$	$\frac{652}{1123} = 0,582$
Средняя суммарная теплоемкость газов в камере, $\text{кДж} / (\text{м}^3 \times \text{К})$	$V \times c$	$\frac{H'_{\Gamma} - H''_{\Gamma}}{T'_{\Gamma} - T''_{\Gamma}}$	$\frac{1280 - 975,4}{1123 - 933} = 1,63$	$\frac{1280 - 880,3}{1123 - 873} = 1,61$

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Число Больцмана	Bo	$\frac{\varphi V_{\Gamma} V c \times 10^{11}}{5,67 \times F_{\Gamma} T_{\Gamma}^3}$	$\frac{0,96 \times 15,6 \times 1,63 \times 10^{11}}{5,67 \times 240,78 \times 1123^3} = 1,25$	$\frac{0,95 \times 9,72 \times 1,61 \times 10^{11}}{5,67 \times 240,78 \times 1123^3} = 0,752$
Сечение для проходов газов, м^2	F_{Γ}		$4,85 \times 6 = 29,1$	$4,85 \times 6 = 29,1$
Средняя температура газов, К	$T_{\text{ср.}\Gamma}$	$0,5 \times (T_{\Gamma} + T_{\Gamma}'')$	$0,5 \times (1123 + 933) = 1028$	$0,5 \times (1123 + 873) = 998$
Скорость газов в камере, м / с	ω_{Γ}	$\frac{T_{\text{ср.}\Gamma} \times V_{\Gamma}}{F_{\Gamma} \times 273}$	$\frac{15,6 \times 1028}{29,1 \times 273} = 2,02$	$\frac{9,72 \times 998}{29,1 \times 273} = 1,22$
В виду небольшой скорости газов в камере конвективная составляющая теплоты не учитывается				
Безразмерная температура на выходе из камеры	θ	$0,686 \left[\sqrt{\left(\frac{Bo \theta}{\alpha_k}\right)^2 + 2,92 \left(\frac{Bo}{\alpha_k} + \theta^4\right) - \frac{Bo}{\alpha_k}} \right]$	$0,686 \left[\sqrt{\left(\frac{1,25}{0,542}\right)^2 + 2,92 \left(\frac{1,25}{0,542} + 0,607^4\right) - \frac{1,25}{0,542}} \right] = 0,84$	$0,686 \left[\sqrt{\left(\frac{0,752}{0,548}\right)^2 + 2,92 \left(\frac{0,752}{0,548} + 0,607^4\right) - \frac{0,752}{0,548}} \right] = 0,77$
Температура газов в конце камеры, К	T_{Γ}''	$\theta \times T_{\Gamma}'$	$0,84 \times 1123 = 944$	$0,77 \times 1123 = 864,7$
Разница между принятой температурой газов в конце камеры и полученной в результате расчета не превышает 50 К, поэтому расчет не уточняется				
Энтальпия газов на выходе из камеры, кДж / м^3	H_{Γ}''	По рис. 3.1	995,5	871,2
Количество теплоты, воспринятой в камере, кДж / м^3	Q_{Γ}	$\varphi \times (H_{\Gamma}' - H_{\Gamma}'')$	$0,96 \times (1280 - 995,5) = 275$	$0,95 \times (1280 - 871,2) = 390,2$
Средняя плотность теплового потока на экраны, кВт / м^2	q_{Γ}	$\frac{Q_{\Gamma} \times V_{\Gamma}}{F_{\Gamma}}$	$\frac{275 \times 15,6}{240,78} = 17,8$	$\frac{390,2 \times 9,72}{240,78} = 15,7$
Расчет испарительных ширм радиационной камеры				

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Температура газов на входе, К	T'_{Γ}	Берется из расчета радиационной камеры	944	864,7
Энтальпия газов на входе, кДж / м ³	H'_{Γ}	Берется из расчета радиационной камеры	995,5	871,2
Лучистая теплота, воспринятая плоскостью входного сечения ширм, кДж / м ³	$Q_{\text{л}}^{\text{вх}}$	$Q_{\text{л}} \frac{F_{\text{л.ш}}}{F_{\text{л}}}$	$275 \times \frac{34,5}{240,78} = 39,4$	$390 \times \frac{34,5}{240,78} = 55,9$
Поправочный коэффициент для учета излучения на пучок за ширмами	ξ	По [9]	0,5	0,6
Температура газов на выходе из ширм, К	$T''_{\text{ш}}$	Принято предварительно	888	811
Энтальпия газов на выходе из ширм, кДж / м ³	$H''_{\text{ш}}$	По рис. 3.1	904,2	783,95
Тепловосприятие ширм по балансу, кДж / м ³	$Q_{\text{ш}}^{\text{б}}$	$\varphi \times (H'_{\Gamma} - H''_{\Gamma})$	$0,96 \times (995,5 - 904,2) = 87,65$	$0,95 \times (867,4 - 783,95) = 79,27$
Средняя температура газов, К	$T_{\text{ср.}\Gamma}$	$0,5 \times (T'_{\Gamma} - T''_{\Gamma})$	$0,5 \times (944 - 888) = 916$	$0,5 \times (864 - 811) = 835,5$
Произведение, м × кПа	$p_{\text{п}}s$	$r_{\text{п}}s$	$0,121 \times 0,74 = 0,09$	0,09
Коэффициент ослабления лучей:				
Трехатомными газами, 1 / (м × Мпа)	k_{Γ}	По [9]	1,75	1,82
Частицами пыли	$k_{\text{п}}$	По [9]	9,4	9,8
Оптическая толщина потока	kps	$(k_{\Gamma}r_{\text{п}} + \mu_{\text{п}}k_{\text{п}})s$	$(1,75 \times 0,121 + 9,4 \times 0,019) \times 0,74 = 0,294$	$(1,82 \times 0,121 + 9,8 \times 0,019) \times 0,74 = 0,304$

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Интегральный коэффициент теплового излучения	α	По [9]	0,255	0,26
Угловой коэффициент с входного на выходного сечение ширм	φ	$\sqrt{\left(\frac{l}{S_1}\right)^2 + 1} - \left(\frac{l}{S_1}\right)$	$\sqrt{\left(\frac{1,725}{0,6}\right)^2 + 1} - \left(\frac{1,725}{0,6}\right) = 0,17$	0,17
Теплота излучения из камеры и ширм на поверхности нагрева конвективной камеры, кДж / м ³	$Q_{\text{л}}^{\text{ввых}}$	$\frac{Q_{\text{л}}^{\text{вх}} \times (1 - \alpha) \times \varphi_{\text{ш}}}{B} + \frac{5,67 \times 10^{11} \times \alpha \times F_{\text{л}}^{\text{ввых}} \times T_{\text{ср.г}}^4 \xi}{V_{\Gamma}}$	$\frac{39,4 \times (1 - 0,255) \times 0,17}{15,6} + \frac{5,67 \times 10^{11} \times 0,255 \times 26,62 \times 916^4 \times 0,5}{15,6} = 13,53$	$\frac{55,9 \times (1 - 0,26) \times 0,17}{15,6} + \frac{5,67 \times 10^{11} \times 0,26 \times 26,19 \times 838^4 \times 0,5}{15,6} = 16,75$
Теплота, полученная излучением ширм, кДж / м ³	$Q_{\text{ш}}^{\text{л}}$	$Q_{\text{л}}^{\text{вх}} - Q_{\text{л}}^{\text{ввых}}$	$39,4 - 13,53 = 25,87$	$55,9 - 16,75 = 39,15$
Скорость газов, м / с	ω_{Γ}	$\frac{T_{\text{ср.г}} \times V_{\Gamma}}{F_{\Gamma} \times 273}$	$\frac{15,6 \times 1028}{29,1 \times 273} = 2,02$	$\frac{9,72 \times 998}{29,1 \times 273} = 1,22$
Коэффициент загрязнения	ε	По [9]	0,0129	0,0129
Температура наружной загрязненной стенки, К	T_3	$T_{\text{н}} + \varepsilon \times \frac{(Q_{\text{л}}^{\text{ш}} + Q_{\text{ш}}^{\text{б}}) \times V_{\Gamma}}{F_{\text{общ}}}$	$522 + 0,0129 \times \frac{(25,87 + 87,65) \times 15,6}{168,5} = 657$	$522 + 0,0129 \times \frac{(39,15 + 82,89) \times 9,72}{168,5} = 612$
Коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м ² × К)	$\alpha_{\text{л}}$	По [9]	$102 - 0,255 = 26$	$79,1 - 0,26 = 20,6$
Физические характеристики газа:				
Кинематическая вязкость, м ² × с	ν	$\mu_{\nu} \times \nu_{\Gamma}$	$97,1 \times 10^6 \times 0,93 = 90,4 \times 10^6$	$83,7 \times 10^6 \times 0,93 = 77,7 \times 10^6$
Теплопроводность, Вт/(м ² × К)	λ	$\mu_{\lambda} \times \lambda_{\Gamma}$	$7,8 \times 10^{-2} \times 0,89 = 6,94 \times 10^{-2}$	$7,1 \times 10^{-2} \times 0,89 = 6,3 \times 10^{-2}$

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Число Прандтля при $T_{\text{ср.г}}$	Pr	$\mu_{Pr} \times Pr_{\Gamma}$	$0,606 \times 0,96 = 0,58$	$0,61 \times 0,95 = 0,58$
Число Прандтля при T_3	Pr	$\mu_{Pr} \times Pr_{\Gamma}$	$0,641 \times 0,96 = 0,615$	$0,605 \times 0,95 = 0,617$
Число Рейнольдса	Re	$\frac{\omega_{\Gamma} \times l}{\nu}$	$\frac{2,13 \times 1,725}{90,4 \times 10^{-6}} = 4,05 \times 10^4$	$\frac{1,22 \times 1,725}{77,7 \times 10^{-6}} = 2,7 \times 10^4$
Характерный размер, м	l	По чертежу	1,725	1,725
Число Нуссельта	Nu	$0,66 \times Re \times 0,5 \times Pr_T^{0,33} \times \left(\frac{Pr_{T_{\text{ср.г}}}}{Pr_{T_3}}\right)^{0,25}$	$0,66 \times (4,05 \times 10^4)^{0,5} \times 0,58^{0,33} \times \left(\frac{0,58}{0,615}\right)^{0,25} = 114$	$0,66 \times (2,7 \times 10^4)^{0,5} \times 0,58^{0,33} \times \left(\frac{0,58}{0,618}\right)^{0,25} = 90,4$
Коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м ² × К)	α_k	$\frac{Nu \times \lambda}{l}$	$\frac{114 \times 6,94 \times 10^{-2}}{1,725} = 4,58$	$\frac{90,4 \times 6,3 \times 10^{-2}}{1,725} = 3,3$
Угловой коэффициент	x	По [9]	0,6	0,6
Коэффициент использования	ξ	Принято	0,95	0,95
Коэффициент теплоотдачи по газовой стороне, Вт/(м ² × К)	α_1	$\xi \times \left(\alpha_k \times \frac{\pi \times d}{2 \times S_2 \times x} + \alpha_l\right)$	$0,95 \times \left(4,58 \times \frac{3,14 \times 0,038}{2 \times 0,075 \times 0,6} + 26\right) = 30,47$	$0,8 \times \left(3,3 \times \frac{3,14 \times 0,038}{2 \times 0,075 \times 0,6} + 20,6\right) = 20$
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² × К)	k	$\frac{\alpha_1}{1 + \left(1 + \frac{Q_{\text{ш}}^{\text{л}}}{Q_{\text{ш}}^{\text{б}}}\right) \times \varepsilon \times \alpha_1}$	$\frac{30,47}{1 + \left(1 + \frac{25,87}{87,65}\right) \times 0,0129 \times 30,47} = 20,2$	$\frac{20}{1 + \left(1 + \frac{39,15}{82,89}\right) \times 0,0129 \times 20} = 14,5$
Температурный напор, К	ΔT	$T_{\text{ср.г}} - T_{\text{н}}$	$916 - 528 = 388$	$837,5 - 528 - 528 = 310$

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Тепловосприятие ширм по уравнению теплопередачи, кДж/м ³	Q_{Γ}	$\frac{k \times \Delta T \times F_{\text{общ}}}{V_{\Gamma}}$	$\frac{20,2 \times 388 \times 168,5}{15,6 \times 10^3} = 84,7$	$\frac{14,5 \times 310 \times 168,5}{9,72 \times 10^3} = 79,4$
Невязка баланса, %	ΔQ	$\frac{Q_6^{\text{III}} - Q_{\Gamma}}{Q_6^{\text{III}}} \times 100$	$\frac{87,65 - 84,7}{87,65} \times 100 = 3$	$\frac{79,4 - 79,27}{79,4} \times 100 = 0,16$
Расчет первой испарительной поверхности конвективной камеры				
Температура газов на входе, К	T_{Γ}'	Из расчета испарительных ширм радиационной камеры	888	811
Энтальпия газов на входе, кДж/м ³	H_{Γ}'	Из расчета испарительных ширм радиационной камеры	904,2	783,95
Температура газов на выходе, К	T_{Γ}''	Принято предварительно	768	715
Энтальпия газов на выходе, кДж/м ³	H_{Γ}''	По рис. 3.1	719,8	636,9
Средняя температура газов, К	$T_{\text{ср.}\Gamma}$	$0,5 \times (T_{\Gamma}' + T_{\Gamma}'')$	$0,5 \times (888 + 768) = 828$	$0,5 \times (811 + 715) = 763$
Произведение	$p_{\text{II}}s$	$pr_{\text{II}}s$	$0,121 \times 0,12 = 0,0145$	0,0145
Коэффициент ослабления лучей, 1 / (м × МПа)				
Трехатомными газами	k_{Γ}	По [9]	4,7	4,8
Частицами пыли	k_{II}	По [9]	10	10,5
Концентрация пыли, кг/кг	μ_{II}	$\frac{0,6 \times \mu'}{\rho_{\Gamma}}$	$\frac{0,6 \times 0,0357}{1,43} = 0,015$	0,015

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Оптическая толщина потока	kps	$(k_{\Gamma}r_{\Pi} + \mu_{\Pi}k_{\Pi})s$	$(0,121 \times 4,7 + 10 \times 0,015) \times 0,12 = 0,0864$	$(0,121 \times 4,8 + 10,5 \times 0,015) \times 0,12 = 0,0895$
Интегральный коэффициент теплового излучения газов	α	$1 - e^{-kps}$	$1 - e^{-0,0864} = 0,08$	$1 - e^{-0,0895} = 0,085$
Теплота излучения из топки и ширм, кДж/м ³	$Q_{\text{вх.л}}$	Из расчета испарительных ширм	13,53	16,75
Коэффициент загрязнения (м ² × К)/Вт	ε	По [9]	0,0129	0,0129
Теплосприятие по балансу, кДж/м ³	Q'_6	$\varphi \times (H'_{\Gamma} - H''_{\Gamma})$	$0,96 \times (904,2 - 719,8) = 178$	$0,95 \times (783,95 - 636,9) = 139,7$
Температура наружной загрязненной стенки, К	T_3	$T_{\text{н}} + \frac{\varepsilon \times (Q_{\text{вх.л}} + Q'_6) \times V_{\Gamma}}{F_{\text{общ}}}$	$522 + \frac{0,0129 \times (13,53 + 178) \times 15600}{559} = 590$	$522 + \frac{0,0129 \times (16,75 + 139,7) \times 9720}{559} = 557$
Коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м ² × К)	$\alpha_{\text{л}}$	По [9]	$79,1 \times 0,08 = 6,32$	$62,8 \times 0,085 = 5,34$
Скорость газов, м × с	ω_{Γ}	$\frac{V_{\Gamma} \times T_{\text{ср.г}}}{273 \times F_{\Gamma}}$	$\frac{15,6 \times 828}{273 \times 23} = 2,06$	$\frac{9,72 \times 763}{273 \times 23} = 1,18$
Физические характеристики газа:				
Кинематическая вязкость, м ² /с	ν	$\mu_{\nu} \times \nu_{\Gamma}$	$82 \times 10^{-6} \times 0,93 = 76,3 \times 10^{-6}$	$71,4 \times 10^{-6} \times 0,93 = 66,4 \times 10^{-6}$
Теплопроводность, Вт/(м ² × К)	λ	$\mu_{\lambda} \times \lambda_{\Gamma}$	$6,05 \times 10^{-2} \times 0,89 = 5,38 \times 10^{-2}$	$5,57 \times 10^{-2} \times 0,89 = 4,96 \times 10^{-2}$
Число Рейнольдса	Re	$\frac{\omega_{\Gamma} \times d}{\nu}$	$\frac{2,05 \times 0,038}{76,3 \times 10^{-6}} = 1021$	$\frac{1,18 \times 0,038}{66,4 \times 10^{-6}} = 675$

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Отношение	ξ	$\frac{S_1 - d}{S_1 - \delta}$	$\frac{150 - 38}{150 - 6} = 0,777$	0,777
Коэффициент [22]	C_S	$0,108 \times \xi^{0,1}$	$0,108 \times 0,777^{0,1} = 0,105$	0,105
Коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м ² × К)	α_k	$C_S \times C_Z \times \frac{\lambda}{d} \times Re^{0,7}$ $C_Z = 1$	$0,105 \times \frac{5,38 \times 10^{-2}}{0,038} \times 1021^{0,7} = 22$	$0,105 \times \frac{4,96 \times 10^{-2}}{0,038} \times 675^{0,7} = 15,24$
Отношение площади поверхности ребер к полной площади поверхности	—	$\frac{F_{рб}}{F_{общ}}$	$\frac{94,8}{500} = 0,2$	0,2
Отношение площади поверхности без ребер к полной площади поверхности	$\frac{F_{гл}}{F_{общ}}$	$\frac{F_{общ} - F_{рб}}{F_{общ}}$	$1 - 0,2 = 0,8$	0,8
Теплопроводность ребер, Вт/(м ² × К)	$\lambda_{рб}$	По [9]	44,2	44,2
Параметры	$\beta \times h_{рб}$	$h_{рб} \times \sqrt{\frac{2 \times \psi \times \alpha_k}{\delta_{рб} \lambda_{рб} (1 + \epsilon \psi - \alpha_k)}}$	$0,0185 \times \sqrt{\frac{2 \times 0,9 \times 22}{0,006 \times 44,2(1 + 0,0129 \times 0,9 - 22)}} = 0,201$	$0,0185 \times \sqrt{\frac{2 \times 0,9 \times 15,24}{0,006 \times 44,2(1 + 0,0129 \times 0,9 - 15)}} = 0,17$
	$\frac{S_2}{d}$		$\frac{0,75}{0,038} = 1,97$	1,97
Коэффициент неравномерности теплоотдачи по поверхности ребер	ψ	По [9]	0,9	0,9
Коэффициент эффективности ребер	E	По [9]	0,98	0,98

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м ² × К)	$\alpha_{\text{к.пр}}$	$\frac{\psi \times \alpha_{\text{к}}}{1 + \varepsilon \times \psi \times \alpha_{\text{к}}}$	$\frac{0,9 \times 22}{1 + 0,0129 \times 0,9 \times 22} = 15,77$	$\frac{0,9 \times 15,24}{1 + 0,0129 \times 0,9 \times 15,24} = 11,7$
Коэффициент использования	ξ	Принято	0,95	0,7
Коэффициент теплоотдачи по газовой стороне, Вт/(м ² × К)	α_1	$\xi \times (\alpha_{\text{к.пр}} + \alpha_{\text{л}})$	$0,95 \times (15,77 + 6,32) = 21$	$0,7 \times (11,7 + 5,34) = 11,9$
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² × К)	k	$\frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \times \alpha_1}$	$\frac{21}{1 + 0,0129 \times 21} = 16,5$	$\frac{11,9}{1 + 0,0129 \times 11,9} = 10,32$
Температурный напор, К	ΔT	$T_{\text{ср.г}} - T_{\text{н}}$	$828 - 528 = 300$	$763 - 528 = 235$
Тепловосприятие по уравнению теплопередачи, кДж/м ³	Q_{Γ}	$\frac{k \times \Delta T \times F_{\text{общ}}}{V_{\Gamma}}$	$\frac{16,5 \times 300 \times 559}{15,6 \times 10^3} = 180,9$	$\frac{10,32 \times 235 \times 559}{9,72 \times 10^3} = 142$
Невязка баланса	ΔQ	$\frac{Q_{\Gamma} - Q_{\text{б}}}{Q_{\Gamma}} \times 100$	$\frac{180,9 - 178}{180,9} \times 100 = 1,6$	$\frac{142 - 139,7}{142} \times 100 = 1,6$
Расчет второй испарительной поверхности конвективной камеры				
Температура газов на входе, К	T'_{Γ}	Из расчета первой испарительной поверхности	768	715
Энтальпия газов на входе, кДж/м ³	H'_{Γ}	Из расчета первой испарительной поверхности	719,8	636,9
Температура газов на выходе, К	T''_{Γ}	Принято предварительно	696	655
Энтальпия газов на выходе, кДж/м ³	H''_{Γ}	По рис. 3.1	608	546,4

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_{\Gamma} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{\Gamma} = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Средняя температура газов, К	$T'_{\text{ср.г}}$	$0,5 \times (T'_{\Gamma} + T''_{\Gamma})$	$0,5 \times (696 + 768) = 732$	$0,5 \times (655 + 715) = 685$
Произведение	$p_{\Pi} S$	$r_{\Pi} S$	$0,121 \times 10^2 \times 0,12 = 1,45$	1,45
Коэффициент ослабления лучей, $1 / (\text{м} \times \text{МПа})$				
Трехатомными газами	k_{Γ}	По [9]	4,8	5,2
Частицами пыли	k_{Π}	По [9]	11	11,5
Концентрация пыли, кг/кг	μ_{Π}	Из расчета первой испарительной поверхности	0,015	0,015
Оптическая толщина потока	kps	$(k_{\Gamma} r_{\Pi} + \mu_{\Pi} k_{\Pi}) \times 10^2$	$(0,121 \times 4,8 + 11 \times 0,015) \times 10^2 = 73,99$	$(0,121 \times 5,2 + 11,5 \times 0,015) \times 10^2 = 80,055$
Интегральный коэффициент излучения газов	α	$1 - e^{-kps}$	0,085	0,09
Коэффициент загрязнения ($\text{м}^2 \times \text{К}$)/Вт	ε	По [9]	0,0155	0,0155
Тепловсприятие поверхности по балансу, кДж/м ³	Q_6	$\varphi \times (H'_{\Gamma} - H''_{\Gamma})$	$0,96 \times (719,8 - 608) = 107,3$	$0,95 \times (636,9 - 546,4) = 85,97$
Температура наружной загрязненной стенки, К	T_3	$T_{\text{н}} + \frac{\varepsilon \times Q_6'' \times V_{\Gamma}}{F_{\text{общ}}}$	$522 + \frac{0,0115 \times 107,3 \times 15600}{581} = 566$	$522 + \frac{0,0115 \times 85,97 \times 9720}{581} = 544$
Коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/($\text{м}^2 \times \text{К}$)	$\alpha_{\text{л}}$	По [9]	$55,8 \times 0,085 = 4,75$	$48,8 \times 0,09 = 4,4$
Средняя скорость газов, м × с	$\omega_{\text{ср.г}}$	$\frac{V_{\Gamma} \times T_{\Gamma}}{273 \times F_{\Gamma}}$	$\frac{15,6 \times 732}{273 \times 17,5} = 2,4$	$\frac{9,72 \times 685}{273 \times 17,5} = 1,39$

Продолжение таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_r = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_r = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Физические характеристики газа:				
Кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$	ν	$\mu_\nu \times \nu_r$	$66,8 \times 10^{-6} \times 0,93 = 62,1 \times 10^{-6}$	$59,7 \times 10^{-6} \times 0,93 = 55,5 \times 10^{-6}$
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$	λ	$\mu_\lambda \times \lambda_r$	$6,2 \times 10^{-2} \times 0,89 = 5,52 \times 10^{-2}$	$5,8 \times 10^{-2} \times 0,89 = 5,16 \times 10^{-2}$
Число Рейнольдса	Re	$\frac{\omega_{\text{ср.г}} \times d}{\nu}$	$\frac{2,4 \times 0,038}{62,1 \times 10^{-6}} = 1456$	$\frac{1,39 \times 0,038}{55,5 \times 10^{-6}} = 959$
Коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$	α_k	$C_S \times C_Z \times \frac{\lambda}{d} \times Re^{0,7}$ $C_Z = 1$	$0,105 \times \frac{5,52 \times 10^{-2}}{0,038} \times 1456^{0,7} = 25$	$0,105 \times \frac{5,16 \times 10^{-2}}{0,038} \times 959^{0,7} = 17,5$
Отношение площади поверхности ребер к полной площади поверхности	—	$\frac{F_{\text{рб}}}{F_{\text{общ}}}$	$\frac{94,8}{500} = 0,2$	0,2
Отношение площади поверхности без ребер к полной площади поверхности	$\frac{F_{\text{гл}}}{F_{\text{общ}}}$	$\frac{F_{\text{общ}} - F_{\text{рб}}}{F_{\text{общ}}}$	$1 - 0,2 = 0,8$	0,8
Теплопроводность ребер, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$	$\lambda_{\text{рб}}$	По [9]	44,2	44,2
Параметры	$\beta \times h_{\text{рб}}$	$h_{\text{рб}} \times \sqrt{\frac{2 \times \psi \times \alpha_k}{\delta_{\text{рб}} \lambda_{\text{рб}} (1 + \varepsilon \psi \times \alpha_k)}}$	$0,0185 \times \sqrt{\frac{2 \times 0,9 \times 25}{0,006 \times 44,8 (1 + 0,0115 \times 0,9 \times 25)}} = 1,97$	$0,0185 \times \sqrt{\frac{2 \times 0,9 \times 25}{0,006 \times 44,8 (1 + 0,0115 \times 0,9 \times 25)}} = 1,97$
	$\frac{S_2}{d}$		$\frac{0,75}{0,038} = 1,97$	1,97

Окончание таблицы 3.4.

Расчетная величина	Обозначение	Расчетная формула	$V_r = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$	$V_r = 9,72 \text{ м}^3/\text{с}$
Коэффициент неравномерности теплоотдачи по поверхности ребер	ψ	По [9]	0,9	0,9
Коэффициент эффективности ребер	E	По [9]	0,97	0,97
Коэффициент	μ	По [9]	1	1
Приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/($\text{м}^2 \times \text{К}$)	$\alpha_{к.пр}$	$\frac{\psi \times \alpha_k}{1 + \varepsilon \times \psi \times \alpha_k} \times \left(\frac{F_{рб}}{F_{общ}} \times E \times \mu + \frac{F_{гл}}{F_{общ}} \right) = \frac{0,9 \times 25}{1 + 0,97 \times 0,9 \times 25} \times (0,2 \times 0,97 \times 1 + 0,8) = 16,63$	16,63	12,56
Коэффициент использования	ξ	Принято	0,8	0,6
Коэффициент теплоотдачи по газовой стороне, Вт/($\text{м}^2 \times \text{К}$)	α_1	$\xi \times (\alpha_{к.пр} + \alpha_л)$	$0,8 \times (16,63 + 4,75) = 17,2$	$0,6 \times (12,56 + 4,4) = 10,1$
Коэффициент теплопередачи, Вт/($\text{м}^2 \times \text{К}$)	k	$\frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \times \alpha_1}$	$\frac{17,1}{1 + 0,0155 \times 17,2} = 13,56$	$\frac{10,2}{1 + 0,0155 \times 10,1} = 8,83$
Температурный напор, К	ΔT	$T_{ср.г} - T_n$	$732 - 528 = 204$	$685 - 528 = 157$
Тепловосприятие по уравнению теплопередачи, кДж/м ³	Q_T	$\frac{k \times \Delta T \times F_{общ}}{V_r}$	$\frac{13,56 \times 204 \times 581}{15,6 \times 10^3} = 104$	$\frac{8,83 \times 157 \times 581}{9,72 \times 10^3} = 82,7$
Невязка баланса	ΔQ	$\frac{Q_T - Q_6}{Q_T} \times 100$	$\frac{107,3 - 104}{107,3} \times 100 = 3,01$	$\frac{85,97 - 82,7}{85,97} \times 100 = 3,8$

Расчеты показали, что температура потока, который проходит через КУ понижалась за аптейком практически в два раза от 1275 до 614 °С. Такие показатели хорошо согласуются с практикой работы комплекса.

Установлено, что при проектном режиме работы комплекса КУ существующей конструкции не обеспечивается охлаждение отходящих из печей газов до температуры, требуемой по условиям сернокислотного производства.

Для того чтобы сернокислотное производство вступило в работу, требуется чтобы конструкция котла-утилизатора могла соответствовать трем основными требованиям, к таким требованиям относят: охлаждение отходящих из установки технологических газов до температуры, которая требуется технологией сернокислотного производства (300...400 °С); обеспечение минимального разбавления газов для того чтобы был меньше подсос воздуха с целью увеличения концентрации диоксида серы; осаждение крупных фракций охлажденной до твердого состояния пыли, выносимой из конвертера или печи.

3.2. Совершенствование конструкции камер нагрева котла-утилизатора

На рисунках 3.2 и 3.3 приведены два варианта реконструкции КУ.

Суть первого варианта заключается в том, чтобы установить 5 двухсветных экранов в радиационной части котла по направлению движения пылегазового потока. Суть второго варианта заключается в удлинении конвективной части котла и установке в ней дополнительного пакета из восьми ширм (см. рис. 3.2). Для оценки теплотехнической эффективности предложенных вариантов реконструкции были проведены исследования теплообмена в КУ существующей конструкции (базовый вариант).

Объем трех рабочих пространств базовой, первой и второй вариантов реконструкций составил соответственно 847, 847 и 951 м², где их суммарная

площадь участвующих в теплообмене поверхностей соответственно – 870, 1095 и 1082 м². Изначально было принято, что через КУ проходят 8,53 м²/с технологических газов, запыленность которых перед котлом составляла – 0,05 кг/м³ и температурой – 1350 °С.

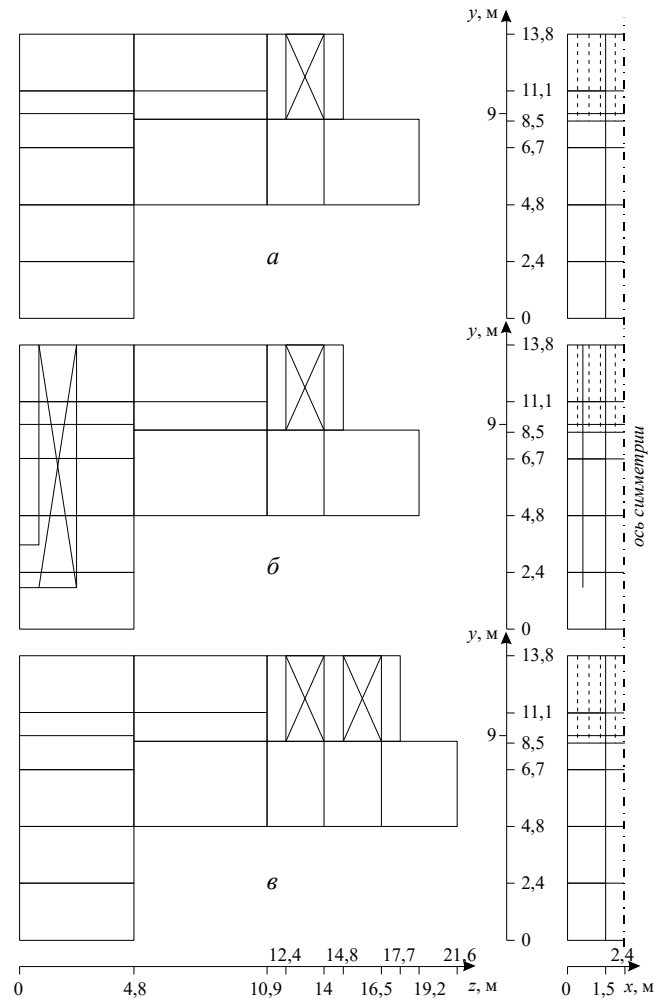


Рисунок 3.2 – Варианты реконструкции КУ ЭТК ПВ:

a – базовый вариант, *б* – первый вариант реконструкции, *в* – второй вариант реконструкции

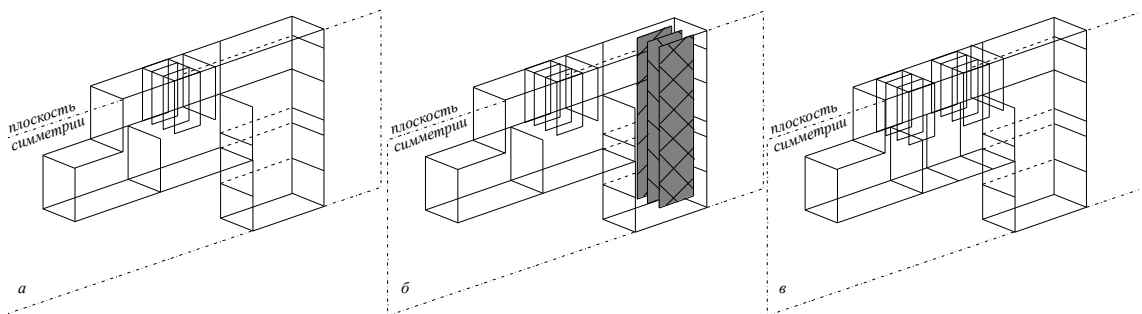


Рисунок 3.3. Схема расположения поверхностей нагрева в камерах КУ:

a – базовый вариант, *б* – первый вариант реконструкции, *в* – второй вариант реконструкции

Установка ширм в радиационной камере (вариант первый) снижает температуру пылегазового потока в ней на 180 °С, а на входе в конвективную часть КУ – на 110 °С. Установка дополнительных ширм в конвективной части и наращивание ее длины (вариант второй) в меньшей степени влияет на показатели теплообмена. В радиационной камере показатели теплообмена для базового и второго вариантов практически не отличаются. Для второго варианта температура газов на входе в область сдвоенных испарительных пакетов на 80 °С меньше, чем в базовом варианте. При этом первый вариант реконструкции КУ дает увеличение суммарного теплопоглощения приблизительно на 12 %, а второй вариант – на 9 %. Показатели теплообмена в рабочем пространстве КУ ЭТК ПВ для рассмотренных вариантов реконструкции приведены в таблице 3.5.

Таким образом, с теплотехнической точки зрения более предпочтительна установка двухсветных экранов в радиационной камере. Двухсветные экраны, расположенные по ходу движения потока газов и оказывающие незначительное аэродинамическое сопротивление позволяют, как отмечалось, снизить в среднем температуру газов на 180 °С, поверхности отложений – на 250 °С. В результате создаются благоприятные температурные условия в радиационной камере КУ, способствующие затвердеванию частиц уноса. При этом твердое состояние поступающих в конвективную часть КУ частиц пылеуноса обеспечивают условия для бесплаковочной работы конвективных поверхностей нагрева.

Таблица 3.5 – Показатели теплообмена в рабочем пространстве КУ ЭТК ПВ

Показатели	Вариант		
	Базовый	1	2
Температура газов на входе, °С:			
– в КУ	1350	1350	1350
– в радиационно-конвективную часть КУ	1017	885	1014
– в область сдвоенного испарительного пакета	662	552	583
Температура газов на выходе, °С:			
– из радиационной камеры КУ	869	759	868
– из КУ	614	324	611
Суммарное теплопоглощение экранами, кВт	18050	20217	19600
Коэффициент эффективности	0,174	0,233	0,206

3.3. Выводы по главе 3

1. Проведен теплотехнический расчет проектного варианта котла-утилизатора РКК-20/40 ЭТК.

2. Показано, что при проектных режимах работы ЭТК ПВ КУ РКК-20/40 существующей конструкции не могут обеспечить охлаждение отходящих из печи газов до требуемой температуры, которая должна быть по условиям сернокислотного производства. Предложена рациональная конструкция КУ с пятью двухсветными экранами расположенными в радиационной части, которая позволяет снизить температуру газов: в радиационной камере на 180 °С, на входе в область испарительных пакетов на 110 °С, на выходе из КУ на 290 °С, поверхности отложений на 250 °С. При этом создаются температурные условия, снижающие вероятность шлакования радиационных и конвективных поверхностей нагрева КУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе решалась задача, направленная на оптимизацию конструкции энерготехнологического комплекса автогенной плавки в жидкой ванне (ЭТК ПВ). В ходе выполнения работы получены следующие результаты.

1. Проведен анализ особенностей теплотехнологических процессов в опытно-промышленной печи ПЖВ-20 для плавки медьсодержащей шихты в жидкой ванне (печи Ванюкова).

2. Выбрана конструкция котла-утилизатора для ЭТК ПВ. Показано, что по своим технико-экономическим характеристикам котел-утилизатор РКК-20/40 удовлетворяет технологическим требованиям медно-никелевого производства и может быть использован в качестве элемента ЭТК ПВ для охлаждения отходящих из плавильной печи технологических газов.

3. Предложена рациональная конструкция ЭТК ПВ, включающая печь Ванюкова и котел-утилизатор РКК-20/40. Показано, что загрузка шихты через окна, расположенные между пиритной и плавильной сторонами печи, уменьшает пылевынос из печи и экранирует тепловое излучение от поверхности ванны расплава на поверхность кладки надслоевого пространства и экранов котла.

4. Проведен теплотехнический расчет проектного варианта котла-утилизатора РКК-20/40 ЭТК. Показано, что при проектных режимах работы ЭТК ПВ котлы-утилизаторы РКК-20/40 существующей конструкции не обеспечивают охлаждение отходящих из печи газов до температуры, требуемой по условиям серноокислотного производства.

5. Предложена рациональная конструкция КУ с пятью двухсветными экранами в радиационной части, позволяющая снизить температуру газов на выходе из КУ – до 290 °С, поверхности отложений – до 250 °С.

Представленный температурный режим работы КУ, снижает вероятность шлакования радиационных и конвективных поверхностей нагрева, а также соответствует технологическим требованиям серноокислотного производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Басов, А. И. Справочник механика заводов цветной металлургии : справочное издание / А. И. Басов, Ф. П. Ельцев. – Москва : Металлургия, 1981. – 496 с.
2. Бледнов, Б. П. Металлургия меди, никеля и сопутствующих элементов (Расчеты по металлургии меди и никеля) : учебное пособие / Б. П. Бледнов, В. Е. Дульнева ; Институт цветных металлов имени М. И. Калинина. – Красноярск : Красноярский институт цветных металлов им. М.И. Калинина (КИЦМ), 1983. – 103 с.
3. Плавка в жидкой ванне : производственное издание / А. В. Ванюков, В. П. Быстров, А. Д. Васкевич [и др.] ; под редакцией А.В. Ванюкова ; – Москва : Металлургия, 1988. – 208 с.
4. Ванюков, А. В. Комплексная переработка медного и никелевого сырья : учебник для вузов / А. В. Ванюков, Н. И. Уткин. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 432с.
5. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / А. П. Воинов, В. А. Зайцев [и др.] ; под редакцией Л. Н. Сидельковский. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 270 с.
6. Диомидовский, Д. А. Металлургические печи цветной металлургии : учебное пособие для вузов / Д. А. Диомидовский. – Москва : Металлургия, 1970. – 702 с.
7. Кривандин, В. А. Металлургические печи : учебное пособие для металлургических специальностей вузов / В. А. Кривандин, Б. Л. Марков ; под общ. ред. В. А. Кривандин. – Москва : Металлургия, 1977. – 463 с.
8. Металлургическая теплотехника. В 2 томах. Т. 2 Конструкция и работа печей : учебник для вузов / В. А. Кривандин, И. Н. Неведомская, В. В. Кобахидзе [и др.] ; – Москва : Металлургия, 1986. – 592 с.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) : нормативно технических материал / Н. В. Кузнецов, В. В. Митор, И. Е. Дубовский, Э. С. Карасина ; под ред. Н. В. Кузнецова. – Москва : Энергия, 1973. – 295с.
10. Купряков, Ю. П. Автогенная плавка медных концентратов во взвешенном состоянии / Ю. П. Купряков. – Москва : Металлургия, 1979. – 232 с.
11. Автогенные процессы в цветной металлургии / В. В. Мечев, В. П. Быстров, А. В. Тарасов [и др.]. – Москва : Металлургия, 1991. – 413 с.
12. Севрюков, Н. Н. Металлургия цветных металлов : учебник для техникумов / Н. Н. Севрюков. – Москва : Металлургия, 1969. – 405 с.
13. Скуратов, А. П. Конструкции и теплотехнический расчет плавильных электрических печей : учеб. пособие для студентов вузов / А. П. Скуратов,

С. Д. Скуратова ; Сиб. федер. ун-т, Политехн. ин-т. – Красноярск : СФУ, 2012. – 166 с.

14. Скуратов, А. П. Повышение эффективности работы высокотемпературных теплотехнологических установок на основе математического моделирования процессов сложного теплообмена : дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.14 : защищена 20.12.2001 / А. П. Скуратов ; конс.: Ю. А. Журавлев, В. Г. Лисиенко ; Краснояр. гос. акад. цвет. металлов и золота, Краснояр. гос. техн. ун-т. - Красноярск, 2001. - 430 с.
15. Уткин, Н.И. Metallургия цветных металлов : учебник для техникумов цветной металлургии : допущено Управлением кадров и учебных заведений Министерства цветной металлургии СССР / Н. И. Уткин. – Москва : Metallургия, 1985. – 439 с.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт

Теплотехники и гидрогазодинамики
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В. А. Кулагин

подпись

инициалы, фамилия

« 22 » июня 2022 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код – наименование направления

Оптимизация работы энерготехнологического комплекса автогенной
плавки в жидкой ванне

тема

Научный руководитель/
руководитель

подпись, дата

Профессор, д-р техн. наук
должность, ученая степень

А.П. Скуратов
инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Д.И. Аксентьев
инициалы, фамилия

Красноярск 2022