МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Энергетический факультет

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине «Синтез и анализ оптимальных систем производства энергии»

Тема: «Разработка математической модели и параметрическая оптимизация технологической схемы теплотехнической системы»

Исполнитель:

магистрант группы 50602121 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Мартинчук А.Ю.

подпись, дата

Руководитель проекта:

д.т.н., профессор \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Седнин В.А.

подпись, дата

Минск 2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Энергетический факультет

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

по дисциплине «Синтез и анализ оптимальных систем производства энергии»

Тема: «Разработка математической модели и параметрическая оптимизация технологической схемы теплотехнической системы»

Исполнитель:

магистрант группы 50602121\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Мартинчук А.Ю.

подпись, дата

Руководитель проекта:

д.т.н., профессор \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Седнин В.А.

подпись, дата

Минск 2021

СОДЕРЖАНИЕ

[ПЕРЕЧЕНЬ используемых СОКРАЩЕНИЙ 5](#_Toc90827587)

[ПЕРЕЧЕНЬ используемых ОБОЗНАЧЕНИЙ 6](#_Toc90827588)

[ВВЕДЕНИЕ 7](#_Toc90827589)

[1 Оценка состояния развития класса исследуемой теплотехнической системы 8](#_Toc90827590)

[2 Синтез расчетной технологической схемы исследуемой системы 13](#_Toc90827591)

[3 разработка математической модели исследуемой системы 17](#_Toc90827592)

[4 разработка алгоритмов реализации математической модели на базе интегрального методА расчета 34](#_Toc90827593)

[4.1 Алгоритм реализации математической модели на базе интегрального метода расчета 34](#_Toc90827594)

[4.2 Контрольный пример 35](#_Toc90827595)

[5 численное исследование и параметрическая оптимизация системы 36](#_Toc90827596)

[заключение 41](#_Toc90827597)

[список используемых источников 42](#_Toc90827598)

# ПЕРЕЧЕНЬ используемых СОКРАЩЕНИЙ

В тексте пояснительной записки курсового проекта были использованы следующие сокращения:

АБХМ – абсорбционная холодильная машина;

ГВТ – газо-водяной теплообменный аппарат;

ТО – теплообменный аппарат;

КПД – коэффициент полезного действия;

МЭ – механическая энергия;

ЭЭ – электрическая энергия;

ТЭ – тепловая энергия;

БУ – балансовое уравнение;

ВР – воздушный рекуператор;

ТХР – термохимическая регенерация.

# ПЕРЕЧЕНЬ используемых ОБОЗНАЧЕНИЙ

В тексте пояснительной записки курсового проекта были использованы следующие обозначения:

Т – турбина;

К – компрессор;

Г – электрический генератор;

П – печь;

ТЦ – термохимический цикл;

п – пар;

в – вода;

в-х – воздух;

т – топливо;

д.г. – дымовые газы.

# ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данного курсового проекта определяется необходимостью обеспечения устойчивого энергетического будущего человечества с перспективой перехода энергетики, основой которой являются ископаемые ресурсы на альтернативные источники энергии, обеспечивающие равновесие процессов преобразования материи и энергии в природе.

Следует отметить, что сегодня на Земле происходит значительный рост численности населения и дальнейшее ускорения экономического развития. Энергия является ключевым ресурсом в данном процессе, при этом ключевыми факторами, обеспечивающими экономическое развитие, являются ее доступность и обеспечение спроса на энергию.

Целью данного проекта является анализ эффективности применения термохимического метода получения водорода на базе термохимического цикла Cu-Cl в металлургии, в т.ч. с использованием источников вторичных энергоресурсов.

В качестве объекта исследования была выбрана схема энерготехнологической установки на базе методической печи прокатного стана с интеграцией в нее технологии по производству водорода. Главная технологическая особенность выбранной для исследования теплотехнической системы – технология производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи. На основании технологической схемы исследуемой системы была разработана расчетная структурная схема, состоящая из 13 элементов и 37 связей. Для формализованного описания математической модели был построен граф теплотехнической системы. Кодировка графа произведена в структурной матрице и матрице видов связей. Разработана математическая модель в составе системы из балансовых уравнений.

На базе интегрального метода расчета были разработаны алгоритмы реализации математической модели. На базе интегрального метода была составлена программа расчета системы балансовых уравнений в среде MS Excel.

В ходе численного исследования и параметрической оптимизации были выбраны критерии эффективности, такие как коэффициент использования топлива, а также электрический коэффициент полезного действия (КПД) утилизационной выработки электроэнергии, и установлено влияние на них параметров элементов системы (температура дымовых газов на выходе из печи, степень сжатия компрессора).

В графической части курсового проекта представлены технологическая и расчетная структурная схемы, граф расчетной схемы, структурная матрица, алгоритм определения теплофизических свойств рабочих тел, а также алгоритм реализации математической модели и параметрической оптимизации и результаты исследования.

# 1 Оценка состояния развития класса исследуемой теплотехнической системы

Объектом исследования в курсового проекта является схемы энерготехнологической установки на базе методической печи прокатного стана.

Металлургическая промышленность является одной из наиболее энергоемких отраслей тяжелой промышленности во всем мире. Удельный вес энергетической составляющей на металлургических заводах – от 18 до 24% [20]. Поэтому сокращение потребления электроэнергии, природного газа или других энергоносителей на несколько процентов влечет за собой существенное снижение себестоимости выпускаемой продукции и повышение конкурентоспособности предприятия на международных рынках.

Из-за специфики технологий в своем большинстве технологические установки, используемые на металлургических предприятиях, имеют относительно невысокий КПД. В то же время результаты исследований металлургических процессов позволяют говорить о допустимости и целесообразности оптимизации энергетических потоков.

Нагревательные печи являются основным видом печей для нагрева и термообработки металлоизделий в металлургии. История развития теории и конструкций нагревательных печей, отапливаемых газообразным топливом, насчитывает 100 лет.

Современные нагревательные печи представляют собой высокомеханизированные агрегаты, удовлетворяющие технологическим и экологическим требованиям, однако жизнь выдвигает новые задачи развития печной техники. Требования к работе нагревательных печей включают в себя:

* обеспечение заданной производительности;
* обеспечение качества нагрева, удовлетворяющего технологов по структуре и по механическим свойствам металла, по степени окалинообразования и обезуглероживания;
* эффективное использование топлива, характеристикой которого служит удельный расход энергии на единицу продукции в кг условного топлива на 1 тонну продукции;
* соответствие экологическим нормам по предельно допустимому выбросу в атмосферу пыли и вредных газов: СО, СО2, NOx, SO2, C20H12 и других углеводородов;
* механизация труда при эксплуатации и ремонте печи и автоматизация её теплового режима.

Интегральным экономическим показателем технологии нагрева и конструкции печи является себестоимость нагрева и срок окупаемости капиталовложений в строительство или реконструкцию печи при гарантированном качестве продукции и соответствии экологическим нормам.

На металлургических заводах нагревательные печи используются для нагрева металла перед прокаткой. Основными потерями теплоты в этих печах являются потери с уходящими дымовыми газами [24, 25]. Температура уходящих дымовых газов составляет 650…950°С. Основная часть теплоты топлива расходуется непосредственно на технологический процесс, а потери с дымовыми газами составляют около 38%.

Из анализа теплового баланса печи, записанного в форме, предложенной И.Д.Семикиным [26], следует вывод о том, что одним из возможных направлений энергосбережения является повышение коэффициента использования теплоты топлива (КИТ), т. е. доли теплоты сгорания топлива, которую удается использовать в пределах рабочего пространства печи.

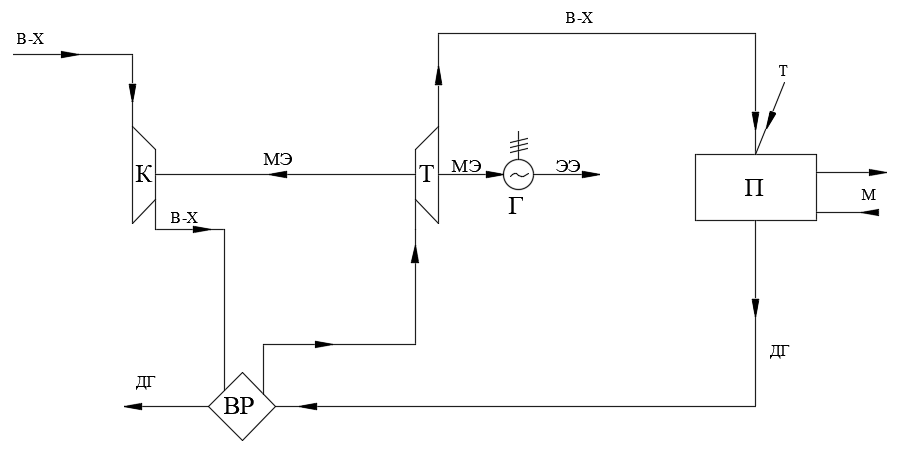
Для повышения КИТ применяют следующие мероприятия:

* снижение температуры уходящих газов в методических печах путем теплообмена с металлом в неотапливаемой зоне;
* уменьшение объема продуктов сгорания на единицу топлива с помощью обогащения воздуха кислородом, путем повышения теплоты сгорания топлива, а также путем полного сжигания топлива при минимальном избытке воздуха;
* уплотнение рабочего пространства и регулирование давления газов в печи с целью устранения подсосов атмосферного воздуха.

Однако наиболее эффективным средством повышения КИТ и экономии топлива является утилизация теплоты уходящих из печи газов, в частности, путем нагрева воздуха и газообразного топлива в рекуператорах.

В качестве основного технического решения обычно применяется регенерация теплоты путем нагрева идущего на горение воздуха до температуры примерно 400…450°С.

Для повышения эффективности технологического процесса рассматривается схема с применением газотурбинной установки с внешним подводом теплоты, работающей по простому циклу Брайтона (рисунок 1.1). Данное техническое решение позволяет нагревать воздух до требуемой температуры, но при этом дополнительно генерируется электроэнергия. Численное исследование показало, что реализация данной схемы позволит дополнительно получить выработку электроэнергии до 4,3% от исходной энергии топлива.



К – компрессор; Т – турбина; Г – электрогенератор; П – печь; ВР – воздушный рекуператор; в-х– воздух; МЭ – механическая энергия; ЭЭ – электрическая энергия; т – топливо; ДГ – дымовые газы.

Рисунок 1.1 – Общая схема теплотехнической системы с применением газотурбинной установки в металлургической промышленности

Основу рассматриваемой схемы составляет методическая печь прокатного стана. На схеме также рассматривается газотурбинная установка. Применение ГТУ позволит нагревать воздух, поступающий в печь, до требуемой температуры, но при этом дополнительно генерируется электроэнергия. Вращение турбины происходит за счёт использования энергии воздуха, поступающего на горение в методическую печь. Турбина служит приводом компрессора, а также используется для получения механической энергии вращения вала, преобразуемой в дальнейшем в электроэнергию.

Воздух после компрессора поступает в рекуператор. В качестве греющей среды в воздушном рекуператоре выступают дымовые после нагревательной печи. В рекуператоре осуществляется утилизация теплоты, содержащейся в дымовых газах.

Далее горячий воздух поступает в газовую турбину, где его теплота используется для получения механической энергии вращения вала. После турбины теплый воздух поступает на горение в методическую печь прокатного стана, в которую также подается природный газ.

В процессе сжигания топлива образуется тепловая энергия, которая используется для технологических процессов нагрева металла.

Дымовые газы после печи поступают в теплообменный аппарат – утилизатор теплоты уходящих дымовых газов.

Дальнейшей оптимизацией теплотехнических схем на базе нагревательных печей прокатного стана является разработка энерготехнологических схем получения водорода.

Водород рассматривается как альтернативный энергоноситель будущего из-за более высокой плотности энергии по массе, меньших экологических проблем при его сжигании и его обильного присутствия в различных формах во Вселенной, а также его конвертируемости в электричество или полезные химические вещества.

Системы производства водорода могут быть спроектированы и разработаны для производства водорода из водородсодержащих ресурсов. Методы производства водорода классифицируют либо по типу ресурса, из которого получают водород, либо по виду технологического источника энергии [8].

Источники энергии, приводящие в действие процесс производства водорода, могут быть тепловыми, биологическими, механическими, электрическими или фотонными.

Для производства водорода разработан ряд технологий: паровой риформинг природного газа, электролиз воды, газификация угля, а также расщепление воды термохимическими методами, например циклом Cu-Cl.

Термохимические циклы расщепления воды основаны на разложении воды посредством повторяющихся стадий химических реакций с использованием промежуточных реакций и веществ, которые в свою очередь перерабатываются в ходе этих процессов, так что общие реакции эквивалентны диссоциации молекулы воды на водород и кислород [16]. Единственным потребляемым веществом в цикле является вода, которая в свою очередь является источником водорода, а все остальные вещества могут быть циклически использованы [17].

Наиболее разработанным является термохимический цикл на основе взаимодействия меди и хлора [19].

Термохимический цикл медь-хлор состоит из промежуточных реакций, в которых используются соединения меди и хлора для упрощения процессов разложения воды на водород и кислород. Существует несколько различных циклов Cu-Cl, различающихся количеством промежуточных реакций, используемых для разложения воды с образованием водорода и кислорода. Три основные группы циклов сгруппированы по количеству стадий, и это трех -, четырех-и пятиступенчатые циклы.

При этом применяют два способа, по которым водород может быть получен посредством цикла Cu-Cl, первый из которых − хлорирование элементарной меди, а второй − хлорирование CuCl. Первый способ используют в четырех- и пятиступенчатых циклах, а второй способ применяется в трехступенчатой версии.

В курсовом проекте исследуется схема энерготехнологической установки на базе методической печи прокатного стана с интеграцией в нее технологии по производству водорода. Для целей производства водорода используется термохимический цикл Cu-Cl.

Общая схема изображена на рисунке 1.2, на котором блок производства водорода представлен в виде «черного ящика».

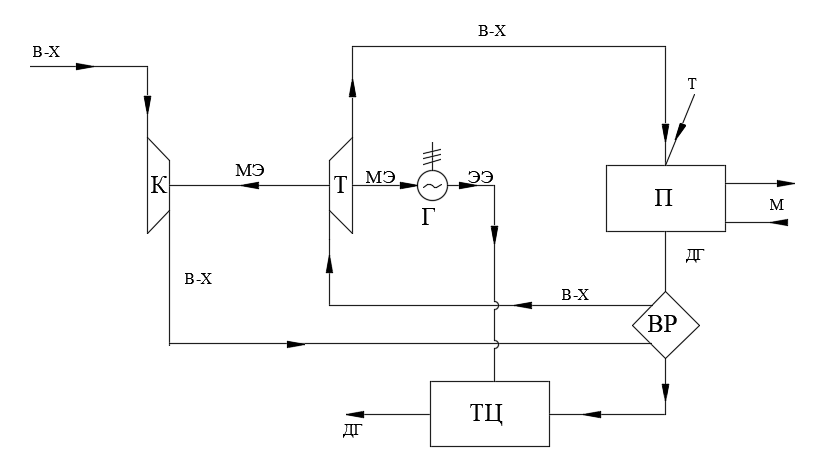
К – компрессор; Т – турбина; Г – электрогенератор; П – печь; ВР – воздушный рекуператор; ТЦ – термохимический цикл медь-хлор; в-х– воздух; МЭ – механическая энергия; ЭЭ – электрическая энергия; т – топливо; ДГ – дымовые газы.

Рисунок 1.2 – Общая схема цикла Cu-Cl применительно к металлургической промышленности

В предлагаемой схеме дымовые газы после печи поступают в ряд теплообменных аппаратов – утилизаторов теплоты уходящих дымовых газов. В первую очередь отработавшие дымовые газы поступают на ступень нагрева воздуха, далее теплота дымовых газов используется для реализации термохимического цикла Cu-Cl.

Помимо этого, для обеспечения реализации процессов генерации водорода к циклу также подводится электроэнергия на процесс гидролиза и на процесс сушки. Таким образом, на выходе цикла Cu-Cl схемой предусматривается генерация водорода и кислорода.

# 2 Синтез расчетной технологической схемы исследуемой системы

Задача синтеза технологической схемы технической системы заключалась в определении ее состава (совокупности элементов), структуры (системы связей между элементами) и совокупности режимных и конструктивных параметров при заданных характеристиках сырьевых потоков и готовой продукции, функции цели и ограничений на параметры.

На основании информации, полученной в результате предварительного обследования объекта моделирования, была сформирована его расчетная технологическая схема. Для реализации каждой стадии технологического процесса были подобраны один или несколько технических элементов.

Так как по исходной информации имеется методическая печь прокатного стана, были рассмотрены схемы утилизация теплоты уходящих дымовых газов. В данном случае обычно применяется следующая технология: утилизация дымовых газов обеспечивается лишь для нагрева воздуха, поступающего на горение.

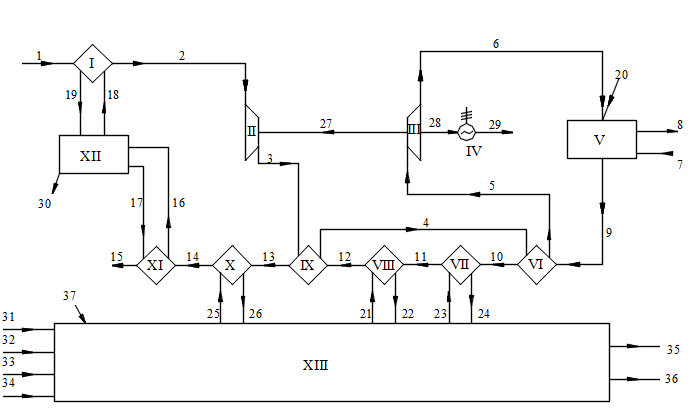
В курсовом проекте в качестве основы теплотехнической системы была выбрана утилизационная схемы, в которой обеспечивается более глубокая утилизация теплоты дымовых газов, помимо этого предусматривается нагрев воздуха, поступающего на горение, а также схемой предусматривается производство водорода.

Главная технологическая особенность выбранной для исследования теплотехнической системы – технология производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl. В курсовой работе рассматривается трехступенчатый термохимический цикла Cu-Cl.

В ходе курсового проекта были установлены и уточнены связи между элементами схемы по потокам вещества и энергии. Определены связи с внешними системами, в том числе с окружающей средой.

Для упрощения математической модели потери вещества и энергии отнесены к соответствующим элементам и количественно учтены в уравнениях баланса через коэффициенты потерь энергии и вещества в окружающую среду. Для упрощения расчетной схемы были исключены насосы.

Расчетная технологическая схема энерготехнологической установки на базе методической печи прокатного стана с интеграцией в нее технологии по производству водорода представлена в графической части и на рисунке 2.1. Расчетная технологическая схема включает 13 элементов и 37 связей.



I – теплообменный аппарат охлаждения воздуха; II – компрессор.

III – турбина; IV – электрогенератор; V – печь; VI – теплообменный аппарат второй ступени нагрева воздуха; VII – теплообменный аппарат нагрева CuOCuCl2 для цикла CuCl; VIII – теплообменный аппарат перегрева пара для цикла CuCl; IX – теплообменный аппарат первой ступени нагрева воздуха; X – теплообменный аппарат генерации пара для цикла CuCl; XI – газо-водяной теплообменный аппарат; XII – АБХМ; XIII – термохимический цикл медь-хлор; 1 – воздух, подаваемый в систему; 2 – воздух, подаваемый в компрессор; 3 – воздух, покидающая в компрессор; 4 – воздух из первой ступени нагрева во вторую; 5 – воздух из второй ступени охлаждения, входящий в турбину; 6 – воздух на горение в нагревательную печь; 7 – материал, подаваемый в печь; 8 – материал после обработки из печи; 9 – дымовые газы из нагревательной печи; 10 – дымовые газы из второй ступени нагрева воздуха; 11 – дымовые газы из тепообменного аппарата нагрева CuOCuCl2; 12 – дымовые газы из теплообменного аппарата перегрева пара, входящие в первую ступень нагрева воздуха; 13 – дымовые газы из первой ступени нагрева воздуха; 14 – дымовые газы из теплообменного аппарата генерации пара, входящие в газо-водяной теплообменный аппарат; 15 – уходящие дымовые газы; 16 – горячая вода на генератор АБХМ; 17 – горячая вода из генератора АБХМ; 18 – вода контура холодоснабжения из АБХМ, поступающая к потребителю холода; 19 – вода контура холодоснабжения от потребителя холода, поступающая в АБХМ; 20 – топливо (природный газ), поступающий в методическую печь; 21 – водяной пар на теплообменный аппарат перегрева пара; 22 – водяной пар из теплообменного аппарата перегрева пара; 23 – CuOCuCl2 в теплообменный аппарат; 24 – CuOCuCl2 в термохимический цикл Cu-Cl; 25 – вода в теплообменный аппарат генерации пара; 26 – водяной пар в термохимический цикл Cu-Cl; 27 – механическая энергия вращения вала турбины, входящая в компрессор; 28 – механическая энергия вращения вала турбины, входящая в электрический генератор; 29 – электрическая энергия, выработанная электрическим генератором; 30 – тепловой поток, отводимый от АБХМ к градирне; 31 – электроэнергия на процесс гидролиза; 32 – электроэнергия на процесс сушки; 33 – тепловая энергия на реактор гидролиза; 34 – тепловая энергия на реактор производства кислорода; 35 – производимый термохимическим циклом водород; 36 – производимый термохимическим циклом кислород; 37 – вода в термохимический цикл Cu-Cl для производства водорода.

Рисунок 2.1 – Расчетная схема теплотехнической системы

В основе газотурбинной технологии лежит газовая турбина и компрессор.

Прежде, чем поступить в компрессор, воздух охлаждается в теплообменном аппарате засчет воды холодильного контура, поступающей от абсорбционной холодильной машины (АБХМ), работающей на горячей воде. Вода контура холодоснабжения возвращается от теплообменного аппарата (ТО) охлаждения воздуха с температурой 12 °C. В испарителе АБХМ вода контура холодоснабжения охлаждается до 6 °C и далее вновь поступает к ТО охлаждения воздуха. Далее атмосферный воздух поступает в компрессор, где осуществляется процесс сжатия.

Реальные процессы расширения и сжатия ввиду наличия сил трения отличаются от теоретических, поэтому для газовой турбины и компрессора сжатия воздуха был учтен относительный внутренний КПД агрегатов.

Воздух после компрессора последовательно проходит две ступени нагрева. Ступени нагрева представляет собой теплообменные аппараты. В качестве греющей среды в данных теплообменных аппаратах выступают дымовые после нагревательной печи на различных стадиях утилизации теплоты, содержащейся в них. Далее горячий воздух направляется в газовую турбину. С целью генерирования электроэнергии газовая турбина соединена на одном валу с электрическим генератором.

Нагретый для требуемых температур подачи воздух поступает на горение в методическую печь прокатного стана, в которую также подается природный газ.

В процессе сжигания топлива выделяется тепловая энергия, которая используется для технологических процессов нагрева металла.

В результате процесса горения образуются высокотемпературные дымовые газы, порядка 950 С. Чтобы повысить эффективности рассматриваемой схемы осуществляется утилизация теплоты дымовых газов.

В первую очередь отработавшие дымовые газы поступают на вторую ступень нагрева воздуха, далее дымовые газы используются для нагрева химического соединения CuOCuCl2, необходимого для реализации термохимического цикла Cu-Cl.

Далее дымовые газы поступают последовательно на следующие теплообменники-утилизаторы: теплообменный аппарат перегрева пара для цикла Cu-Cl, теплообменный аппарат первой ступени нагрева воздуха, теплообменный аппарат генерации пара для цикла Cu-Cl, газо-водяной теплообменный аппарат.

Интеграция в металлургическую промышленность технологии по производству водорода посредством цикла Cu-Cl позволяет повысить полноту использования топлива, а также дополнительно вырабатывать электроэнергию.

Дальнейшим направлением оптимизации рассматриваемой энерготехнологической установки является использования синтез-газа в системах термохимической регенерации теплоты высокотемпературных дымовых газов.

Для большого числа огнетехнических установок представляет интерес утилизация теплоты высокотемпературных отходящих дымовых газов за счет термохимической регенерации (ТХР).

Сущность ТХР тепла отходящих дымовых газов, заключается в использовании их физического тепла для предварительной эндотермической переработки исходного топлива, которое при этом получает больший запас химически связанного тепла. За счет использования термохимической регенерации теплоты предполагается увеличение КПД промышленных огнетехнических установок до 90–95%. Необходимым условием осуществимости процесса ТХР - температура отходящих дымовых газов должна быть не менее 700–800 °С.

Полученный в результате термохимической регенерации синтез-газ используется как топливо для теплотехнологической установки, снижая при этом потребление исходного топлива.

# 3 разработка математической модели исследуемой системы

Математическая модель объекта может быть представлена в виде совокупности математического описания структуры системы, системы балансовых уравнений элементов системы, системы ограничений на параметры и функции цели.

Графически структура и связи элементов в модели представлены с помощью графа на листе 1 графической части работы и рисунке 3.1.

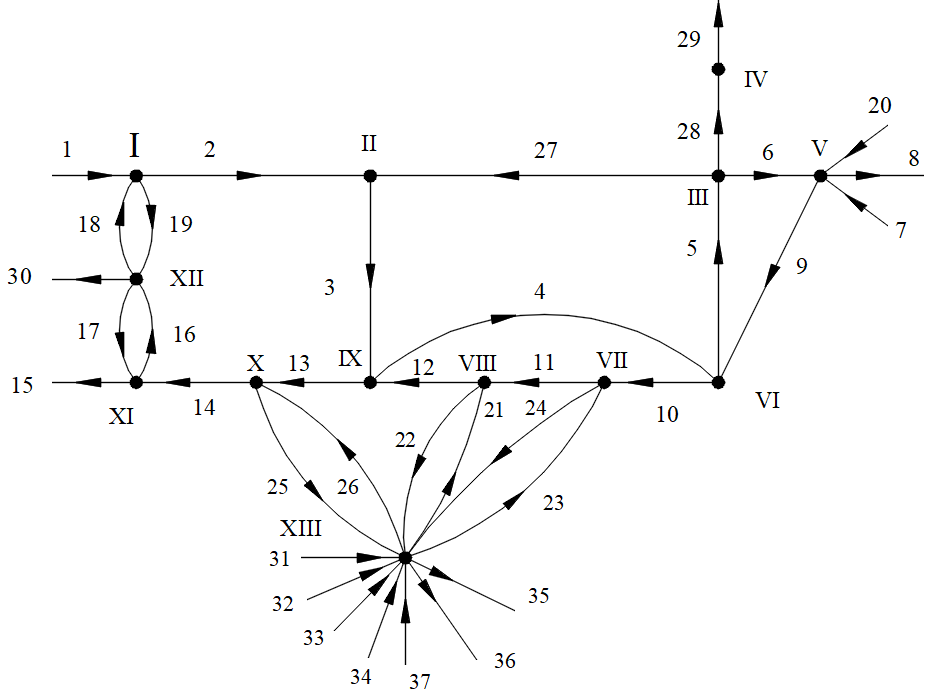


Рисунок 3.1 – Ориентированный граф технической системы

Кодировка графа произведена в структурной матрице (таблица 3.1) и матрице видов связей (таблица 3.2).

Проанализировав структурную матрицу, был сделан вывод, что в расчетной схеме 14 внешних и 23 внутренних связей. Внутренние связи участвуют в построении матрицы контуров.

Таблица 3.1 – Структурная матрица

18

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | XIII | Σ |
| 1 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 2 | -1 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 3 |  | -1 |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  | 0 |
| 4 |  |  |  |  |  | 1 |  |  | -1 |  |  |  |  | 0 |
| 5 |  |  | 1 |  |  | -1 |  |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 6 |  |  | -1 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 7 |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 8 |  |  |  |  | -1 |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 |
| 9 |  |  |  |  | -1 | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 10 |  |  |  |  |  | -1 | 1 |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 11 |  |  |  |  |  |  | -1 | 1 |  |  |  |  |  | 0 |
| 12 |  |  |  |  |  |  |  | -1 | 1 |  |  |  |  | 0 |
| 13 |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 | 1 |  |  |  | 0 |
| 14 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 | 1 |  |  | 0 |
| 15 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 |  |  | -1 |
| 16 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 | 1 |  | 0 |
| 17 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | -1 |  | 0 |
| 18 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 |  | 0 |
| 19 | -1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  | 0 |
| 20 |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 21 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  | -1 | 0 |
| 22 |  |  |  |  |  |  |  | -1 |  |  |  |  | 1 | 0 |
| 23 |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  | -1 | 0 |
| 24 |  |  |  |  |  |  | -1 |  |  |  |  |  | 1 | 0 |
| 25 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  | -1 | 0 |
| 26 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 |  |  | 1 | 0 |
| 27 |  | 1 | -1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 0 |

Продолжение таблицы 3.1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | XIII | Σ |
| 28 |  |  | -1 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 29 |  |  |  | -1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 |
| 30 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 |  | -1 |
| 31 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 1 |
| 32 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 1 |
| 33 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 1 |
| 34 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 1 |
| 35 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 | -1 |
| 36 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 | -1 |
| 37 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 1 |
|  | 4 | 3 | 4 | 2 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 13 |  |

19

Таблица 3.2 – Матрица видов связи

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | В-х | Вода | ДГ | Т-во | Материал | Пар | CuOCuCl2 | H2 | O2 | MЭ | ЭЭ | ТЭ |  |
| 1 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 2 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 3 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 4 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 5 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 6 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 7 |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 8 |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 9 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 10 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 11 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 12 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 13 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 14 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 15 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 16 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 17 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 18 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 19 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 20 |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 21 |  |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 22 |  |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 23 |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  | 1 |
| 24 |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  | 1 |
| 25 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 26 |  |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 27 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  | 1 |
| 28 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  | 1 |
| 29 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  | 1 |
| 30 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 31 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  | 1 |
| 32 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  | 1 |
| 33 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 1 |
| 34 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 1 |
| 35 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  | 1 |
| 36 |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  |  | 1 |
| 37 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Σ | 6 | 6 | 7 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 |  |
| l | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 |  |
| Σ\*l | 18 | 18 | 28 | 4 | 6 | 9 | 8 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 104 |

Проанализировав матрицу видов связи, был сделан вывод, что в расчетной схеме имеется 12 видов энергоносителей. Виды связи имеют следующие частоты повторения: топливо – 1, воздух – 6, дымовые газы – 7, вода – 6, пар – 3, CuOCuCl2 – 2, H2 – 1, O2 – 1, тепловая энергия – 2, механическая энергия – 2, электрическая энергия – 3.

Для каждого элемента системы записаны следующие уравнения:

* баланса энергии для *k*-го элемента:

 (3.1)

* материального баланса для *i*-го энергоносителя в *k*-м элементе:

 (3.2)

* изменения давления *i*-го энергоносителя в *k*-м элементе:

 (3.3)

* изменения энтальпии *i*-го энергоносителя в *k*-м элементе:

 (3.4)

где *G* – расход энергоносителя;

*N* – мощность электрической или механической связи;

*р* и *h* – соответственно давление и энтальпия энергоносителя исходящей ('') или входящей (') связи элемента;

*∆р* и *∆h* – соответственно изменения давления и энтальпии соответствующих теплоносителей в элементах;

γ – коэффициент, учитывающий потери связывающего потока в окружающую среду.

Системы балансовых уравнений для каждого элемента представлены в таблице 3.3. Перечень параметров математической модели представлен в таблице 3.4.

Таблица 3.3 – Система балансовых уравнений

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № элемента | Обозначение элемента | Балансовые уравнения |
| 1 | 2 | 3 |
| I | Теплообменный аппарат охлаждения воздуха |  |
| II | Компрессор |  |
| III | Турбина |  |
| IV | Электрогенератор |  |
| V | Нагревательная печь |  |
| VI | Теплообменный аппарат второй ступени нагрева воздуха |  |

Продолжение таблицы 3.3

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1 | 2 |  |
| VII | Теплообменный аппарат нагрева CuOCuCl2 |  |
| VIII | Теплообменный перегрева пара |  |
| IX | Теплообменный аппарат первой ступени нагрева воздуха |  |
| X | Теплообменный аппарат генерации пара |  |
| XI | Газо-водяной теплообменный аппарат |  |

Окончание таблицы 3.3

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1 | 2 |  |
| XII | АБХМ |  |
| XIII | Цикл Cu-Cl |  |

В качестве зависимых переменных приняты расходы, энтальпии, мощности механической, электрической и тепловой энергий. Ограничения на переменные представлены в графе 5 таблицы 3.4.

Таблица 3.4 – Перечень параметров математической модели

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № п.п. | Наименование параметров | Единицы измерения | Обозначение | Диапазон изменения | Примечание |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Связь 1 – вход в теплообменник охлаждения – воздух | | | | | |
| 1 | Расход | кг/с | *G1* | 0... | Зависим. |
| 2 | Температура | °С | *t1* | 20…35 | Реглам. |
| 3 | Давление | МПа | *p1* | 0… | Реглам. |
| 4 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h1* | *f (t1,p1)* | Зависим. |

Продолжение таблицы 3.4

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Связь 2 – выход из теплообменника охлаждения – воздух | | | | | |
| 5 | Расход | кг/с | *G2* | 0... | Зависим. |
| 6 | Температура | °С | *t2* | 10…15 | Управл. |
| 7 | Давление | МПа | *р2* | 0… | Зависим. |
| 8 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h2* | *f (t2,p2)* | Зависим. |
| Связь 3 – выход из компрессора – воздух | | | | | |
| 9 | Расход | кг/с | *G3* | 0... | Зависим. |
| 10 | Температура | °С | *t3* | 0… | Зависим. |
| 11 | Давление | МПа | *р3* | 0… | Зависим. |
| 12 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h3* | *f (t3,p3)* | Зависим. |
| Связь 4 – выход из первой ступень нагрева – воздух | | | | | |
| 13 | Расход | кг/с | *G4* | 0… | Зависим. |
| 14 | Температура | °С | *t4* | 450…550 | Управл. |
| 15 | Давление | МПа | *р4* | 0… | Зависим. |
| 16 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h4* | *f(t4,р4)* | Зависим. |
| Связь 5 – выход из второй ступени нагрева – воздух | | | | | |
| 17 | Расход | кг/с | *G5* | 0… | Зависим. |
| 18 | Температура | °С | *t5* | 0… | Зависим. |
| 19 | Давление | МПа | *р5* | 0… | Зависим. |
| 20 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h5* | *f(t5,р5)* | Зависим. |
| Связь 6 – выход из турбины – воздух | | | | | |
| 21 | Расход | кг/с | *G6* | 0… | Зависим. |
| 22 | Температура | °С | *t6* | 0… | Зависим. |
| 23 | Давление | МПа | *р6* | 0… | Зависим. |
| 24 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h6* | *f(t6,р6)* | Зависим. |
| Связь 7 – вход в нагревательную печь – материал | | | | | |
| 25 | Расход | кг/с | *G7* | 0… | Зависим. |
| 26 | Температура | °С | *t7* | 20 | Реглам. |
| 27 | Давление | МПа | *р7* | 0… | Реглам. |
| 28 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h7* | *f(t7,р7)* | Зависим. |
| Связь 8 – выход из нагревательной печи – материал | | | | | |
| 25 | Расход | кг/с | *G8* | 0… | Зависим. |
| 26 | Температура | °С | *t8* | 1200 | Управл. |
| 27 | Давление | МПа | *р8* | 0… | Реглам. |
| 28 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h8* | *f(t8,р8)* | Зависим. |
| Связь 9 – выход из нагревательной печи – дымовые газы | | | | | |
| 29 | Расход | кг/с | *G9* | 0… | Зависим. |
| 30 | Температура | °С | *t9* | 850..950 | Управл. |
| 31 | Давление | МПа | *p9* | 0… | Зависим. |
| 32 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h9* | *f(t9,р9)* | Зависим. |

Продолжение таблицы 3.4

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Связь 10 – выход из второй ступени нагерва – дымовые газы | | | | | |
| 33 | Расход | кг/с | *G10* | 0... | Зависим. |
| 34 | Температура | °С | *t10* | 750 | Управл. |
| 35 | Давление | МПа | *p10* | 0… | Реглам. |
| 36 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h10* | *f (t10,p10)* | Зависим. |
| Связь 11 – выход из теплообменника нагрева CuOCuCl2 – дымовые газы | | | | | |
| 37 | Расход | кг/с | *G11* | 0... | Зависим. |
| 38 | Температура | °С | *t11* | 735 | Управл. |
| 39 | Давление | МПа | *p11* | 0… | Зависим. |
| 40 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h11* | *f (t11,p11)* | Зависим. |
| Связь 12 – выход из теплообменника перегрева пара – дымовые газы | | | | | |
| 41 | Расход | кг/с | *G12* | 0... | Зависим. |
| 42 | Температура | °С | *t12* | 0… | Зависим. |
| 43 | Давление | МПа | *p12* | 0… | Зависим. |
| 44 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h12* | *f (t12,p12)* | Зависим. |
| Связь 13 – выход из первой ступени нагрева – дымовые газы | | | | | |
| 45 | Расход | кг/с | *G13* | 0… | Зависим. |
| 46 | Температура | °С | *t13* | 0… | Зависим. |
| 47 | Давление | МПа | *р13* | 0… | Зависим. |
| 48 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h13* | *f(t13,р13)* | Зависим. |
| Связь 14 – выход из теплообменника генерации пара – дымовые газы | | | | | |
| 49 | Расход | кг/с | *G14* | 0... | Зависим. |
| 50 | Температура | °С | *t14* | 0… | Зависим. |
| 51 | Давление | МПа | *p14* | 0… | Зависим. |
| 52 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h14* | *f (t14,p14)* | Зависим. |
| Связь 15 – выход из газо-водяного теплообменника – дымовые газы | | | | | |
| 53 | Расход | кг/с | *G15* | 0... | Зависим. |
| 54 | Температура | °С | *t15* | 70…90 | Зависим. |
| 55 | Давление | МПа | *p15* | 0… | Зависим. |
| 56 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h15* | *f (t15,p15)* | Зависим. |
| Связь 16 – вход в генератор АБХМ – вода | | | | | |
| 57 | Расход | кг/с | *G16* | 0... | Зависим. |
| 58 | Температура | °С | *t16* | 0… | Управл. |
| 59 | Давление | МПа | *p16* | 0… | Зависим. |
| 60 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h16* | *f (t16,p16)* | Зависим. |
| Связь 17 – выход из генератора АБХМ – вода | | | | | |
| 61 | Расход | кг/с | *G17* | 0... | Зависим. |
| 62 | Температура | °С | *t17* | 0… | Управл. |
| 63 | Давление | МПа | *p17* | 0… | Зависим. |
| 64 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h17* | *f (t17,p17)* | Зависим. |

Продолжение таблицы 3.4

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Связь 18 – выход из испарителя АБХМ – вода | | | | | |
| 65 | Расход | кг/с | *G18* | 0... | Зависим. |
| 66 | Температура | °С | *t18* | 0… | Управл. |
| 67 | Давление | МПа | *p18* | 0… | Зависим. |
| 68 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h18* | *f (t18,p18)* | Зависим. |
| Связь 19 – вход в испаритель АБХМ – вода | | | | | |
| 69 | Расход | кг/с | *G19* | 0... | Зависим. |
| 70 | Температура | °С | *t19* | 0… | Управл. |
| 71 | Давление | МПа | *p19* | 0… | Зависим. |
| 72 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h19* | *f (t19,p19)* | Зависим. |
| Связь 20 – вход в нагревательную печь – топливо | | | | | |
| 73 | Расход | кг/с | *G20* | 0... | Зависим. |
| 74 | Температура | °С | *t20* | 20 | Реглам. |
| 75 | Давление | МПа | *p20* | 0… | Реглам. |
| 76 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h20* | *f (t20,p20)* | Зависим. |
| Связь 21 – вход в теплообменник перегрева пара – пар | | | | | |
| 77 | Расход | кг/с | *G21* | 0... | Зависим. |
| 78 | Температура | °С | *t21* | 0… | Управл. |
| 79 | Давление | МПа | *p21* | 0… | Зависим. |
| 80 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h21* | *f (t21,p21)* | Зависим. |
| Связь 22 – выход из теплообменника перегрева пара – пар | | | | | |
| 81 | Расход | кг/с | *G22* | 0... | Зависим. |
| 82 | Температура | °С | *t22* | 0… | Управл. |
| 83 | Давление | МПа | *p22* | 0… | Зависим. |
| 84 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h22* | *f (t22,p22)* | Зависим. |
| Связь 23 – вход d теплообменник нагрева CuOCuCl2 – CuOCuCl2 | | | | | |
| 85 | Расход | кг/с | *G23* | 0... | Зависим. |
| 86 | Температура | °С | *t23* | 0… | Зависим. |
| 87 | Давление | МПа | *p23* | 0… | Зависим. |
| 88 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h23* | *f (t23,p23)* | Зависим. |
| Связь 24 – выход из теплообменника нагрева CuOCuCl2 – CuOCuCl2 | | | | | |
| 89 | Расход | кг/с | *G24* | 0... | Зависим. |
| 90 | Температура | °С | *t24* | 0… | Зависим. |
| 91 | Давление | МПа | *p24* | 0… | Зависим. |
| 92 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h24* | *f (t24,p24)* | Зависим. |
| Связь 25 – вход в теплообменник генерации пара – вода | | | | | |
| 93 | Расход | кг/с | *G25* | 0... | Зависим. |
| 94 | Температура | °С | *t25* | 0… | Зависим. |
| 95 | Давление | МПа | *p25* | 0… | Зависим. |
| 96 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h25* | *f (t25,p25)* | Зависим. |

Окончание таблицы 3.4

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Связь 26 – выход из теплообменника генерации пара – пар | | | | | |
| 97 | Расход | кг/с | *G26* | 0... | Зависим. |
| 98 | Температура | °С | *t26* | 0… | Управл. |
| 99 | Давление | МПа | *p26* | 0… | Зависим. |
| 100 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h26* | *f (t26,p26)* | Зависим. |
| Связь 27 – отводимая от турбины к компрессору механическая энергия | | | | | |
| 101 | Мощность | кВт | *N27* | 0… | Зависим. |
| Связь 28 – отводимая от турбины к генератору механическая энергия | | | | | |
| 102 | Мощность | кВт | *N28* | 0… | Зависим. |
| Связь 29 – отводимая от генератора электрическая энергия | | | | | |
| 103 | Мощность | кВт | *N29* | 0… | Зависим. |
| Связь 30 – отводимая от АБХМ тепловая энергия | | | | | |
| 104 | Мощность | кВт | *Q30* | 0… | Зависим. |
| Связь 31 – подводимая электрическая энергия на процесс гидролиза | | | | | |
| 105 | Мощность | кВт | *WээГ* | 0… | Зависим. |
| Связь 32 – подводимая электрическая энергия на процесс сушки | | | | | |
| 106 | Мощность | кВт | *WээС* | 0… | Зависим. |
| Связь 33 – подводимая тепловая энергия на реактор гидролиза | | | | | |
| 107 | Мощность | кВт | *QтэГ* | 0… | Зависим. |
| Связь 34 – подводимая тепловая энергия на реактор производства кислорода | | | | | |
| 108 | Мощность | кВт | *Qтэк* | 0… | Зависим. |
| Связь 35 – выход из цикла Cu-Cl – H2 | | | | | |
| 109 | Расход | кг/с | *G35* | 0… | Зависим. |
| 110 | Температура | °С | *t35* | 0… | Управл. |
| 111 | Давление | МПа | *p35* | 0… | Реглам. |
| 112 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h35* | *f(t35,р35)* | Зависим. |
| Связь 36 – выход из цикла Cu-Cl – O2 | | | | | |
| 113 | Расход | кг/с | *G36* | 0… | Зависим. |
| 114 | Температура | °С | *t36* | 0… | Управл. |
| 115 | Давление | МПа | *p36* | 0… | Реглам. |
| 116 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h36* | *f(t36,р36)* | Зависим. |
| Связь 37 – вход в цикл Cu-Cl – вода | | | | | |
| 117 | Расход | кг/с | *G37* | 0… | Зависим. |
| 118 | Температура | °С | *t37* | 0… | Управл. |
| 119 | Давление | МПа | *p37* | 0… | Реглам. |
| 120 | Энтальпия | кДж/(кг·°С) | *h37* | *f(t37,р37)* | Зависим. |

Из уравнений следует, что следующие параметры равны:

Неизвестные системы представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Неизвестные параметры математической модели

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 |
| *G2*  *G16*  *G18*  *G20*  *G23*  *G25*  *G37* | *h13*  *h14*  *h15* | *N29*  *Q30*  *W31*  *W32*  *Q33*  *Q34* |
| всего: 7 | всего: 3 | всего: 6 |

Расход воздуха, поступающего в систему, рассчитывался по формуле:

|  |
| --- |
|  |

Для определения температуры воздуха после компрессора использовалась формула [21]:

Для определения температуры воздуха после турбины использовалась формула [21]:

Мощность теплообменника перегрева пара, требуемого для цикла производства водорода:

где отношение мощности ТО перегрева пара к мощности ТО нагрева CuOCuCl2, кВт/(кВт) [22].

Мощность теплообменника генерации пара, требуемого для цикла производства водорода:

где тношение мощности ТО генерации пара к мощности ТО нагрева CuOCuCl2, кВт/(кВт) [22].

Расход водорода, производимого за счет утилизации теплоты дымовых газов от нагревательной печи:

где массовая доля водорода по отношению к расходу пара, % [22].

Расход кислорода, производимого за счет утилизации теплоты дымовых газов от нагревательной печи:

где массовая доля кислорода по отношению к расходу пара, % [22].

Электроэнергия, требуемая для обеспечения процесса гидролиза системы производства водорода, определялась по формуле [22]:

Электроэнергия, требуемая для обеспечения процесса сушки системы производства водорода, определялась по формуле [22]:

Количество тепловой мощности, требуемой для функционирования реактора гидролиза системы производства водорода, определялась по формуле [22]:

где отношение тепловой энергии, необходимой для процесса гидролиза к расходу производимого водорода, МВт/(кг/с) [22].

Количество тепловой мощности, требуемой для функционирования реактора производства кислорода системы производства водорода, определялась по формуле [22]:

где отношение тепловой энергии, необходимой для реактора производства кислорода к расходу производимого водорода, МВт/(кг/с) [22].

В результате упрощения системы балансовых уравнений была разработана модель макроуровня, которая представлена следующим образом:

Были выбраны следующие критерии эффективности: коэффициент использования топлива, а также электрический коэффициент полезного действия (КПД) утилизационной выработки электроэнергии.

Коэффициент использования топлива был найден по формуле:

где – низшая теплота сгорания водорода.

Электрический КПД был найден по формуле:

Перечень задаваемых при расчете параметров системы представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Перечень задаваемых параметров

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Обозначение величины | Единицы измерения | Численное значение |
| 1 | 2 | 3 | 5 |
| 1 |  |  | 25 |
| 2 |  |  | 10 |
| 3 |  |  | 260 |
| 4 |  |  | 20 |
| 5 |  |  | 1200 |
| 6 |  |  | 950 |
| 7 |  |  | 750 |
| 8 |  |  | 735 |
| 9 |  |  | 90 |
| 10 |  |  | 70 |
| 11 |  |  | 7 |
| 12 |  |  | 12 |
| 13 |  |  | 20 |
| 14 | α | ‒ | 1,3 |
| 15 | γ1...16 | ‒ | 0,94 ‒ 0,98 |
| 16 |  | ‒ | 0,34 |
| 17 |  | ‒ | 2,75 |
| 18 |  | ‒ | 52,63 |
| 19 |  | ‒ | 52,58 |
| 20 |  | ‒ | 8,2 |
| 21 |  | ‒ | 5,6 |
| 22 |  | ‒ | 6,5 |
| 23 |  | % | 80 |
| 24 |  | ‒ | 5,2 |
| 25 |  | ‒ | 1,4 |
| 26 |  | % | 80 |
| 27 |  | % | 94 |
| 28 |  | % | 64 |
| 29 |  | МДж/м3 | 33,2 |
| 30 |  | ‒ | 0,7 |

# 4 разработка алгоритмов реализации математической модели на базе интегрального методА расчета

## 4.1 Алгоритм реализации математической модели на базе интегрального метода расчета

Был разработан алгоритм реализации математической модели на базе интегрального метода расчета. Блок-схема алгоритма реализации математической модели и параметрической оптимизации приведена на рисунке 4.1. Листинг программы, необходимой для решения системы балансовых уравнений в среде MS Excel, представлен в приложении А.

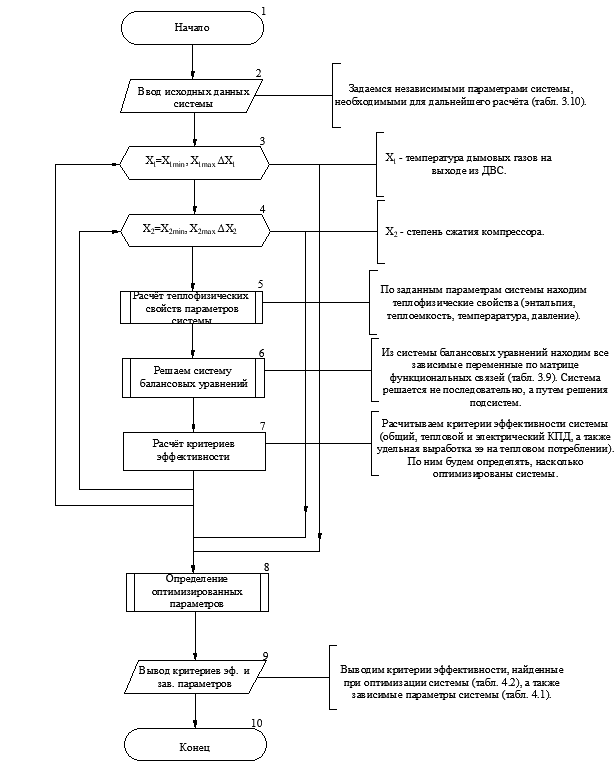


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма реализации математической модели и параметрической оптимизации

## 4.2 Контрольный пример

Был проведен расчет на базе интегрального метода.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 3.6. Контрольный результат представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчета

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Обозначение величины | Единицы измерения | Численное значение |
| G2 | кг/с | 18,5 |
| G16 | кг/с | 9,1 |
| G18 | кг/с | 25,5 |
| G20 | кг/с | 1,4 |
| G23 | кг/с | 0,88 |
| G25 | кг/с | 6,4 |
| G37 | кг/с | 0,36 |
| t3 |  | 260 |
| t5 |  | 716 |
| t6 |  | 419 |
| t12 |  | 609 |
| t13 |  | 381 |
| t14 |  | 282 |
| t15 |  | 250 |
| N29 | кВт | 1836 |
| Q30 | кВт | 1295 |
| W31 | кВт | 1086 |
| W32 | кВт | 652 |
| Q33 | кВт | 2078 |
| Q34 | кВт | 2076 |

Результаты расчета критериев эффективности приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчета критериев эффективности

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Критерий | Обозначение | Единицы измерения | Численное значение |
| 1 | Коэффициент использования топлива |  | % | 74,2 |
| 2 | Электрический КПД |  | % | 3,9 |

# 5 численное исследование и параметрическая оптимизация системы

В ходе численного анализа эффективности энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl было изучено влияние на критерии эффективности (коэффициент использования топлива и электрический КПД системы) температуры дымовых газов на выходе из печи и степени сжатия воздуха в компрессоре ГТУ . Значение температуры дымовых газов на выходе из печи принималась в интервале . Значение степени сжатия компрессора - в интервале Шаг изменяемых параметров был принят: для температуры дымовых газов на выходе из печи , для степени сжатия компрессора . Результаты численного исследования приведены на рисунках 5.1 – 5.4.

Рисунок 5.1 – Коэффициент использования топлива от температуры дымовых газов на выходе из печи энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl

Рисунок 5.2 – Электрический КПД от температуры дымовых газов на выходе из печи энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl

Рисунок 5.3 – Коэффициент использования топлива от степени сжатия компрессора энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl

Рисунок 5.4 – Электрический КПД от степени сжатия компрессора энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl

Полученные результаты показывают, что коэффициент использования топлива и электрической КПД энерготехнологической установки в заданной области исследования достигают максимума в точке с различными изменяемыми параметрами исследуемой системы.

Из графиков 5.1 и 5.3 следует, что увеличение коэффициента использования топлива предлагаемой схемы происходит вследствие снижения температуры дымовых газов за рассматриваемой нагревательной печью, а также степени сжатия компрессора энерготехнологической установки. Это объясняется следующим образом: с увеличением температуры дымовых газов на выходе из печи возрастает также температура уходящих дымовых газов предлагаемой схемы, что означает неполную утилизацию теплоты дымовых газов и, как следствие, потери теплоты в окружающую среду с потоком уходящих газов. Вместе с тем возрастание температуры дымовых газов на выходе из нагревательной печи является следствием увеличения расхода топлива в систему. Таким образом, в совокупности вышеперечисленные факторы уменьшают коэффициент использования топлива предлагаемой схемы.

При этом уменьшение степени сжатия компрессора благоприятно сказывается на росте коэффициента использования топлива. Снижение степени сжатия компрессора приводит к увеличению мощности утилизационного теплообменника первой ступени нагрева воздуха. Это связано с более низкими температурами воздуха на входе в теплообменник в сравнение со случаями, когда степень сжатия компрессора составляет 6,5. Следовательно, при осуществляет более полная утилизация теплоты уходящих газов, что в свою очередь приводит к росту коэффициент использования топлива энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl.

Из графиков 5.2 и 5.4 следует, что увеличение электрического КПД утилизационной выработки электроэнергии происходит вследствие повышения температуры дымовых газов за рассматриваемой нагревательной печью, и снижения степени сжатия компрессора энерготехнологической установки.

Увеличение температуры дымовых газов за нагревательной печью увеличивает температуру воздуха, поступающего на турбину. Следовательно, возрастает работа, совершаемая турбиной. Именно это приводит к возрастанию электрического КПД утилизационной выработки электроэнергии. Помимо этого, снижение степени сжатия компрессора уменьшает работу на привод компрессора, что также оказывает на влияние на рост электрического КПД системы. Однако уменьшение степени сжатия также имеет предел. Для случая, когда температура уходящих газов за печью составляет , пределом снижения степени сжатия является . Далее снижать степень сжатия компрессора не целесообразно. Это можно объяснить ограниченностью потока утилизируемых дымовых газов.

Из вышесказанного очевидно, что для нахождения точки оптимума системы необходимо понижать степень сжатия компрессора энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl. В качестве точки оптимума была принята точка с температурой дымовых газов на выходе из печи при степени сжатия воздуха 4,5.

Основные характеристики исследуемой принципиальной схемы в точке оптимума представлены таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Итоговые характеристики эффективности энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl в точке оптимума

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Наименование | Значение | Размерность |
| Расход топлива (природного газа) | 1,3 | м3/с |
| Тепловая мощность нагревательной печи по потоку топлива | 43,2 | МВт |
| Мощность выработки электроэнергии | 1,32 | МВт |
| Мощность потребление электроэнергии на производство водорода | 1,58 | МВт |
| Производительность по водороду | 3,1 | т/сутки |
| Тепловая мощность потока производимого водорода | 4,33 | МВт |
| Электрический КПД утилизационной выработки электроэнергии | 3,1 | % |
| Относительная мощность потока производимого водорода | 10,1 | % |
| Коэффициент использования топлива | 76,9 | % |

Таким образом, анализ полученных данных показывает, что при использовании ВЭР в металлургии на основе предложенной регенеративно-утилизационная схемы на базе нагревательной печи прокатного стана и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl представляется возможным дополнительно получить:

* выработку тепловой мощности потока водорода до 10% от тепловой мощности нагревательной печи по потоку топлива.

# заключение

Основной целью курсового проекта являлась разработка математической модели и программного комплекса для анализа и параметрической оптимизации теплотехнической системы. Объектом исследования являлась регенеративно-утилизационная схемы на базе нагревательной печи прокатного стана.

На основе расчетной технологической схемы была разработана математическая модель энерготехнологической системы в составе системы из 17 балансовых уравнений. Расчетная технологическая схема включает в себя 13 элементов и 37 связей. Разработан алгоритм реализации математической модели на базе интегрального метода расчета.

Проведено численное исследование и параметрическая оптимизация энерготехнологической установки на базе нагревательной печи прокатного стана и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl. Расчёт всех параметров был произведён в программе MS Excel.

Полученные в ходе исследования результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Необходимость обеспечения устойчивого развития общества требует поиск новых технических решений в области энергетики, и в ближайшей перспективе одним из наиболее успешных может оказаться широкое применение водорода в качестве энергоносителя. В рамках промышленного производства и энергетики удачным решением в части производства водорода могут стать гибридные методы, одним из которых является термохимический метод на базе цикла Cu-Cl.
2. Выполнено численное исследование схемы энерготехнологической установки на базе методической нагревательной печи прокатного стана и цикла Cu-Cl, отличающееся от классической схемы возможностью при сохранении технологического графика нагрева материала осуществлять химическую регенерацию тепловых отходов печи (теплоты дымовых газов) до 10% в виде водорода от исходной мощности топлива, подаваемого в печь.
3. Установлена целесообразность применения использования гибридных методов получения водорода в промышленности при использовании высокотемпературных вторичных энергоресурсов. В частности, для создания энерготехнологических установок на базе печи прокатного стана.

# список используемых источников

1. Key world energy statistics. International Energy Agency. Paris: France; 2018.
2. World energy outlook. International Energy Agency. Paris: France; 2015.
3. Nicoletti G, Arcuri N, Nicoletti G, Bruno R. A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. Energy Convers Manag 2015;89: 205-13 .
4. Muradov N, Veziroglu TN. From hydrocarbon to hydrogen-carbon to hydrogen economy. Int J Hydrogen Energy 2005;30: 225-37 .
5. Pagliaro M, Konstandopoulos AG. Solar Hydrogen: Fuel of the Future. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry; 2012.
6. Staffell I, Scamman D, Velazquez Abad A, Balcombe P, Dodds PE, Ekins P, et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. Energy Environ Sci 2018;12: 463-91 .
7. Abdalla AM, Hossain S, Nisfindy OB, Azad AT, Dawood M, Azad AK. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: a review. Energy Convers Manag 2018;165: 602-27 .
8. Dincer I, Zamfirescu C. Sustainable hydrogen production options and role of IAHE. Int J Hydrog Energy 2012;37: 16266-86
9. US department of energy (DOE), hydrogen energy strategy plan; 2011.
10. Parkinson B, Balcombe P, Speirs JF, Hawkes AD, Hellgardt K. Levelized cost of CO2 mitigation from hydrogen production routes. Energy Environ Sci 2019;12:19.
11. The Development of Lifecycle Data for Hydrogen Fuel Production and Delivery. By the Institute of Transportation Studies, UC Davis. Prepared for the California Air Resources Board and the California Environmental Protection Agency; 2017.
12. Landman A, Dotan H, Shter GE, Wullenkord M, Houaijia A, Maljusch A, et al. Photoelectrochemical water splitting in separate oxygen and hydrogen cells. Nat Mater 2017;16: 646-51 .
13. Guerra OJ, Eichman J, Kurtz J, Hodge B. Cost Competitiveness of Electrolytic Hydrogen. Joule 2019. https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.006.
14. Editorial On the right track Nature Energy. 4; 2019: 69.
15. Arregi A, Amutio M, Lopez G, Bilbao J, Olazar M. Evaluation of thermochemica routes for hydrogen production from biomass: a review. Energy Convers Manag 2018;165: 696-719 .
16. T-Raissi A. Water Splitting: Thermochemical. In: Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry. John Wiley & Sons, Ltd; 2012.
17. Naterer GF, Dincer I, Zamfirescu C. Hydrogen Production from Nuclear Energy. London: Springer-Verlag; 2013.
18. Roeb M, Sattler C. Fuels - Hydrogen production| Thermochemical Cycles. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources. Elsevier; 2009. p. 384-93 .
19. Funk JE. Thermochemical hydrogen production: past and present. Int J Hydrog Energy 2001;26: 185-90 .
20. Седнин В.А. Анализ эффективности регенеративно-утилизационной схемы с воздушной газотурбинной установкой на базе нагревательной печи прокатного стана / В.А. Седнин, Е. О. Иванчиков, В. А. Калий // Энергоэффективность. – Сентябрь 2021. – С. 25-29.
21. Хрусталев, Б.М. Техническая термодинамика. В 2 частях. Часть 2 / Б.М. Хрусталев, А.П. Несенчук, В.Н. Романюк. – Минск : БНТУ, 2004. – 560 с.
22. LAW, V., PRINDLE, J. C., LUPULESCU, A. & SHENSKY, W. 2008. Aspen modelling of the three reaction version of the copper-chlorine thermochemical cycle for Hydrogen production  
    from water. 2008 New Orleans. Tulane University.
23. The International Association for the Properties of Water and Steam [Электронный ресурс] / The International Association for the Properties of Water and Steam | Main IAPWS Thermodynamic Property Formulations. – Режим доступа: http://iapws.org – Дата доступа: 01.11.2021.
24. Несенчук, А.П. Промышленные теплотехнологии. Машиностроительное и металлургическое производство / А.П. Несенчук, В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, Н.Л. Мандель // Минск: Высшая школа, 1995. – 412 с.
25. Данилов, Н.И. Основы энергосбережения: учебник / Н.И. Данилов, Я.М. Щелоков; под ред. Н.И. Данилова // Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 564 с.
26. Румянцев В.Д., Ольшанский В.М. Теплотехника: Учебное пособие / Под ред. В.И.Губинского. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 325 с.