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 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Калий В.А.

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 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Калий В.А.

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:

ТО – теплообменный аппарат;

КПД – коэффициент полезного действия;

МЭ – механическая энергия;

ЭЭ – электрическая энергия;

ТЭ – тепловая энергия;

БУ – балансовое уравнение;

ТХР – термохимическая регенерация.

# ПЕРЕЧЕНЬ используемых ОБОЗНАЧЕНИЙ

В тексте пояснительной записки курсового проекта были использованы следующие обозначения:

Т – турбина;

К – компрессор;

Г – электрический генератор;

ТЦ – термохимический цикл;

п – пар;

в – вода;

в-х – воздух;

т – топливо;

д.г. – дымовые газы.

# ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данного 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. В настоящее время 80% первичной энергии в мире производится из ископаемых видов топлива [1]. Среди них 32% приходится на нефть, которая по-прежнему является преимущественно используемым видом ископаемого топлива для транспортных средств. Согласно докладу Международного энергетического агентства (МЭА) о перспективах развития энергетических технологий за 2015 год, с целью ограничения глобального повышения температуры в пределах 2 °C, выбросы CO2, связанные с энергетическими и промышленными процессами, должны быть снижены примерно на 60% [2].

В качестве объекта исследования была выбрана схема энерготехнологической установки на базе паросилового блока ТЭЦ и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl. Главная технологическая особенность выбранной для исследования теплотехнической системы – технология производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl.

Альтернативные, безуглеродные, виды топлива, такие как водород и аммиак, рассматриваются как долгосрочные безуглеродные решения для обеспечения энергетической устойчивости и борьбы с изменением климата [4]. Применение водородного топлива позволяет сократить выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ.

Большая часть водорода, доступного на земле, находится в форме H2O, и для разрыва водородно-кислородной связи в воде необходимо подвести энергию. Способы производства водорода различаются видом подведенной энергии (электрическая, тепловая, ядерная и др.). Для производства водорода разработан ряд технологий: паровой риформинг природного газа, электролиз воды, газификация угля, а также расщепление воды термохимическими методами, например, циклом Cu-Cl.

# 1 Оценка состояния развития класса исследуемой теплотехнической системы

Объектом исследования курсового проекта является схема паросилового блока ТЭЦ.

Теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) — разновидность тепловой электростанции, которая не только производит электроэнергию, но и является источником тепловой энергии в централизованных системах теплоснабжения (в виде пара и горячей воды, в том числе и для обеспечения горячего водоснабжения и отопления жилых и промышленных объектов).

ТЭЦ конструктивно устроена, как конденсационная электростанция (КЭС, ГРЭС). Главное отличие ТЭЦ от КЭС состоит в доле выработки тепловой и электрической энергии и устройстве паровой турбины.

В зависимости от вида паровой турбины (как правило, на ТЭЦ устанавливаются теплофикационные паровые турбины), существуют различные схемы отборы пара, которые позволяют забирать из неё пар с разными параметрами. Теплофикационные турбины позволяют регулировать количество отбираемого пара. Отобранный пар конденсируется в сетевых подогревателях и передаёт свою энергию сетевой воде, которая направляется на пиковые водогрейные котельные и тепловые пункты. На ТЭЦ есть возможность перекрывать тепловые отборы пара, в этом случае ТЭЦ вырабатывает только электрическую энергию. Это даёт возможность работать ТЭЦ по двум графикам нагрузки:

* тепловому — электрическая нагрузка сильно зависит от тепловой нагрузки (тепловая нагрузка — приоритет);
* электрическому — электрическая нагрузка не зависит от тепловой, либо тепловая нагрузка вовсе отсутствует, например, в летний период (приоритет — электрическая нагрузка).

Совмещение функций генерации тепла и электроэнергии (когенерация) выгодно, так как оставшееся тепло, которое не участвует в работе на КЭС, используется в отоплении. Это повышает расчётный КПД в целом (35—43 % у ТЭЦ и 30 % у КЭС), но не говорит об экономичности ТЭЦ. Основными же показателями экономичности являются: удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении и КПД цикла КЭС.

При строительстве ТЭЦ необходимо учитывать близость потребителей тепла в виде горячей воды и пара, так как передача тепла на большие расстояния экономически нецелесообразна и сложна технически. Дальнейшей оптимизацией теплотехнических схем на базе нагревательных печей прокатного стана является разработка энерготехнологических схем получения водорода.

Регенеративный подогрев конденсата и питательной воды отработавшим в турбине паром обеспечивает приращение КПД современных конденсационных паротурбинных установок на 16-18 % и является одним из основных источников повышения эффективности теплоэнергетических установок и экономии топлива на электростанциях. Энергетическая эффективность регенеративного процесса заключается главным образом в уменьшении потерь теплоты в конденсаторе турбины. Пар регенеративных отборов совершает работу в турбине без потерь теплоты в конденсаторе. Холодным источником для этого пара служит конденсат и питательная вода, воспринимающие теплоту отработавшего в турбине пара. При этом повышается температура подвода теплоты в цикле, уменьшается количество теплоты, подводимой к единице массы рабочего тела, и снижаются потери теплоты в холодном источнике, что ведет к повышению термического КПД цикла паротурбинной установки и экономии топлива [27].

Регенеративный подогрев воды на теплофикационных паротурбинных установках также обеспечивает экономию топлива, уменьшая потери теплоты в конденсаторе и повышая выработку электроэнергии на тепловом потреблении. Поэтому все теплофикационные паротурбинные установки имеют развитые системы регенерации [28]. Вместе с тем имеются и существенные различия во влиянии регенеративного процесса на эффективность конденсационных и теплофикационных паротурбинных установок. Эти различия определяются главным образом технологической схемой теплофикационных турбоустановок, значительная часть которых, как отмечено ранее, может работать практически без потерь теплоты в конденсаторе.

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 паросилового блока ТЭЦ с интеграцией в схему 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».



I – котёл, II – турбина, III – генератор, IV – конденсатор, V – конденсатный насос, VI – теплообменник пар/конденсат, VII – деаэратор, VIII – насос питательной воды котла, IX – теплообменник подогрева воды перед котлом

Рисунок 1.1 – Общая схема цикла Cu-Cl применительно к рассматриваемой схеме

В предлагаемой схеме пар из отбора теплофикационной турбины 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

В самом общем случае задача синтеза технологической схемы технической системы заключается 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, формируется его расчетная технологическая схема. Для реализации каждой стадии технологического процесса подбирается один или несколько технических элементов.

После определения состава технологических элементов устанавливаем и уточняем связи между ними по потокам вещества и энергии. Определяются также связи с внешними системами, в том числе с окружающей средой. Каждому конкретному материальному или энергетическому потоку соответствует связь, поэтому возможны варианты, когда два элемента имеют несколько общих связей, направления которых могут быть противоположными.

Таким образом, при составлении технологических схем используются два типа элементов: технологические и транспортные. К первым относятся элементы, в которых происходят преобразования массы и энергии, ко вторым – элементы, служащие для транспорта материальных и энергетических потоков, т. е. для соединения технологических элементов между собой.

Теплоносители и рабочие тела, посредством которых осуществляются различные технологические процессы в элементах оборудования и связи между ними, будем называть энергоносителями. Условно принимаем, что связи по механической и электрической энергии также осуществляются соответствующими энергоносителями. Каждая стационарная связь характеризуются строго заданным направлением, соответствующим действительному направлению движения потока энергоносителя между элементами оборудования. Связи, осуществляемые каким-либо теплоносителем (если известен их состав), однозначно определяются одним расходным и двумя термодинамическими параметрами его состояния, и поэтому их считают трехпараметрическими. Механические и электрические связи количественно характеризуются мощностью, поэтому их называют однопараметрическими.

После построения структуры системы и определения состава в нее входящих элементов оценивается сложность расчетной схемы и определяется уровень глубины исследования.

В курсовом проекте в качестве основы теплотехнической системы была выбрана схема с паровой теплофикационной турбиной ТЭЦ. с отборами пара к потребителю и для нужд схемы, помимо этого 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 цикл 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 – котёл, II – турбина, III – генератор, IV – конденсатор, V – конденсатный насос, VI – теплообменник пар/конденсат, VII – деаэратор, VIII – насос питательной воды котла, IX – теплообменник подогрева воды перед котлом; 1 – топливо, подаваемое в котёл; 2 – воздух; 3 – пар на турбину; 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;

Рисунок 2.1 – Расчетная схема теплотехнической системы

# 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.

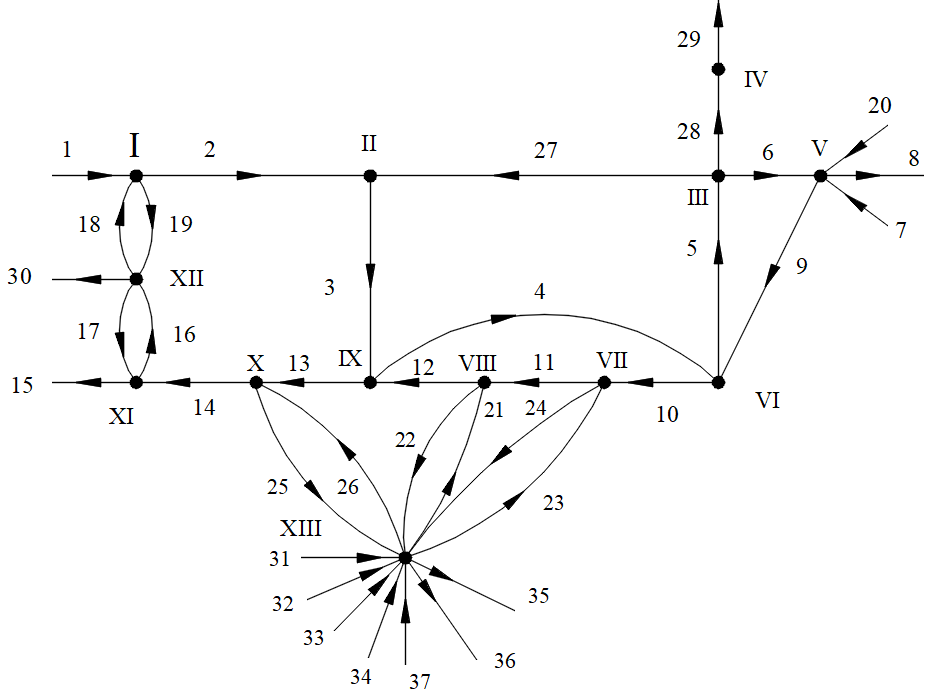


Рисунок 3.1 – Ориентированный граф технической системы

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 | 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 | 0 |
| 15 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 |
| 16 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 17 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 18 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 19 | -1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 20 |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  | 1 |
| 21 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  | 0 |
| 22 |  |  |  |  |  |  |  | -1 |  |  | 0 |
| 23 |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  |  | 0 |
| 24 |  |  |  |  |  |  | -1 |  |  |  | 0 |
| 25 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 0 |
| 26 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | -1 | 0 |
| 27 |  | 1 | -1 |  |  |  |  |  |  |  | 0 |
| 28 |  |  | -1 | 1 |  |  |  |  |  |  | 0 |

19

Таблица 3.2 – Матрица видов связи

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | В-х | Вода | ДГ | Т-во | Пар | H2 | O2 | MЭ | ЭЭ | ТЭ |  |
| 1 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 2 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 3 | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  | 1 |
| 4 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 5 | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  | 1 |
| 6 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 7 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 8 |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  | 1 |
| 9 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 10 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 11 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 12 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  | 1 | 1 |
| 13 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 14 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 15 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 16 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  | 1 | 1 |
| 17 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 18 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 19 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 20 |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 21 |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  | 1 |
| 22 |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  | 1 |
| 23 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 24 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 25 |  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  | 1 |
| 26 |  |  |  |  | 1 |  |  |  |  |  | 1 |
| 27 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  | 1 |
| 28 |  |  |  |  |  |  |  | 1 |  |  | 1 |
| Σ | 6 | 5 | 7 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 |  |
| l | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 |  |
| Σ\*l | 18 | 18 | 28 | 4 | 9 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 104 |

Проанализировав матрицу видов связи, был сделан вывод, что в расчетной схеме имеется 10 видов энергоносителей.

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 |  |
| VII | Теплообменный аппарат нагрева CuOCuCl2 |  |
| VIII | Теплообменный перегрева пара |  |

Продолжение таблицы 3.3

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| IX | Теплообменный аппарат первой ступени нагрева воздуха |  |
| X | Теплообменный аппарат генерации пара |  |

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. | |
| 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. |

Продолжение таблицы 3.4

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | 6 |
| 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. |
| 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. |

Продолжение таблицы 3.4

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 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. |
| 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. |

Окончание таблицы 3.4

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 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. |
| 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. |

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:

где расходы пара соответственно: на турбину, в первый, второй, третий отборы, в термохимический цикл Cu-Cl и на конденсатор, кг/с;

расходы соответственно: воздуха на входе в систему, подпиточной воды котла, водорода, кислорода, кг /с;

энтальпии соответственно: пара на входе в турбину, конденсата после конденсатора, подпиточной воды деаэратора, конденсата после теплообменника догрева воды перед деаэратором, воды, идущей из деаэратора, конденсата после теплообменника подогрева воды перед котлом, питательной воды котла, ;

теоретическое значение энтальпий пара соответственно: на турбину, в первый, второй, третий отборы, в термохимический цикл Cu-Cl и на конденсатор,;

, действительное значение энтальпий пара соответственно: на турбину, в первый, второй, третий отборы, в термохимический цикл Cu-Cl и на конденсатор,;

энтальпии насыщенной жидкости в третьем и пятом отборе соответственно,;

энтальпии насыщенного пара в третьем и пятом отборе соответственно,;

степени сухости пара в третьем и пятом отборе, соответственно;

температуры соответственно: конденсата после конденсатора, подпиточной воды деаэратора, конденсата после теплообменника догрева воды перед деаэратором, воды, идущей из деаэратора, конденсата после теплообменника подогрева воды перед котлом, питательной воды котла, ;

коэффициенты отбора пара;

энтропия пара на входе в турбину;

энтропии насыщенной жидкости в третьем и пятом отборе соответственно,;

энтропии насыщенного пара в третьем и пятом отборе соответственно,;

расход топлива в систему, кг/с;

теоретический расход воздуха на 1 кг топлива кг /кг;

коэффициент избытка воздуха;

КПД соответственно: внутренний КПД турбины, электромеханический;

мощности соответственно: турбины, теплообменника догрева воды перед деаэратором, теплообменника нагрева питательной воды котла, расчётная турбины, мощность, требуемая для функционирования реактора гидролиза, мощность, требуемая для функционирования реактора кислорода, кВт;

процент продувки котла;

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.

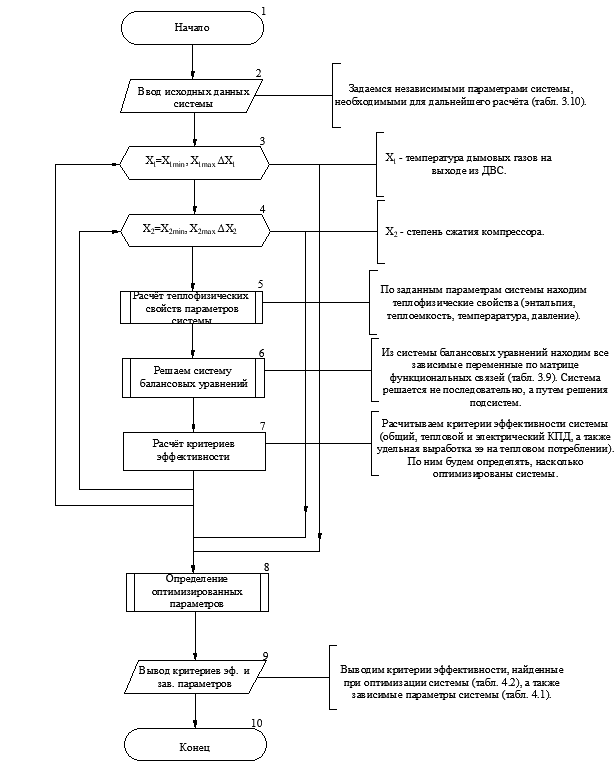


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма реализации математической модели и параметрической оптимизации

## 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 |

# 5 численное исследование и параметрическая оптимизация системы

Алгоритм реализации представленной математической модели в виде методики расчета принципиальной схемы энерготехнологической установки на базе паросилового блока ТЭЦ и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl представлен ниже. Основные характеристики исследуемой принципиальной схемы и данные расчёта представлены таблице 5.1, более подробная информация по параметрам в ключевых точках схемы приведена в таблице 5.2.

Таблица 5.1 – Основные данные расчёта

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Наименование | Обозначение | Значение |
| 1 | 2 | 4 |
| Расчетная мощность турбины энергоблока | МВт | 50 |
| Расход топлива в систему | кг/с | 3,2 |
| Тепловая мощность потока топлива | МВт | 135 |
| Мощность отпуска теплоты теплопотребителям | МВт | 39 |
| Доля пара из отбора, идущего на производство водорода |  | 0,4 |
| Снижение электрической мощности блока | МВт | 22,5 |
| Мощность потребления электроэнергии на производство водорода | МВт | 7,75 |
| Производительность по водороду | т/сутки | 5,4 |
| Тепловая мощность потока производимого водорода | МВт | 7,6 |
| Производительность по кислороду | т/сутки | 37,1 |

Значение энтальпии и энтропии пара для всех точек расчёта было определено, используя зависимости, приведенные Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (IAPWS) [23]:

Энтальпия пара на входе в турбину:

Энтропия пара на входе в турбину:

Расход пара, необходимого на турбину:

Расход топлива, вносимого в систему:

Расход воздуха, необходимого на горение:

Энтропия насыщенной жидкости в первом отборе:

Энтропия насыщенного пара в первом отборе:

Температура пара в первом отборе:

Теоретическое значение энтальпии пара в первом отборе:

Действительное значение энтальпии пара в первом отборе:

Расход пара в первый отбор находится по следующей зависимости:

Расчёт параметров пара во второй отбор и отбор на цикл Cu-Cl отбор производится аналогично расчёту первого отбора.

Энтропия насыщенной жидкости в третьем отборе:

Энтропия насыщенного пара в третьем отборе:

Степень сухости пара в третьем отборе:

Энтальпия насыщенной жидкости в третьем отборе:

Энтальпия насыщенного пара в третьем отборе:

Теоретическое значение энтальпии пара в третьем отборе:

Действительное значение энтальпии пара в третьем отборе находится аналогично формуле (5.4):

Расход пара в третий отбор находится аналогично формуле (5.5):

Энтальпия конденсата после конденсатора

где удельная массовая изобарная теплоемкость воды, кДж/(кг·°С)

Энтальпия подпиточной воды деаэратора определена аналогично формуле (5.8).

Мощность теплообменника подогрева воды в деаэратор:

Энтальпия конденсата после теплообменника подогрева воды в деаэратор определена аналогично формуле (5.8).

Расход питательной воды котла:

Энтальпия воды из деаэратора , энтальпия конденсата после теплообменника подогрева питательной воды , энтальпия питательной воды котла определены аналогично формуле (5.8).

Мощность теплообменника подогрева воды в деаэратор:

Расход водорода, производимого за счет пара из отбора теплофикационной турбины:

Расход кислорода, производимого за счет пара из отбора теплофикационной турбины:

Электроэнергия, требуемая для обеспечения процесса гидролиза системы производства водорода, определялась по формуле

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

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

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

Расчётная мощность турбины определяется следующим образом:

Таким образом, использование отбора пара от турбины мощностью 50 МВт позволяет получить в сутки 5,4 т водорода и 37,1 т кислорода.

Результаты исследования приведены на рисунке 5.1.

Рисунок 5.1 – Зависимость производительности системы по водороду и кислороду от расхода топлива

При потреблении 7,75 МВт электрической мощности турбины и 31,4 МВт теплового потока из отбора турбины, мощность потока произведённого водорода составляет 7,6 МВт.

В ходе численного анализа эффективности энерготехнологической установки на базе паросилового блока ТЭЦ и технологии производства водорода посредством гибридного термохимического цикла Cu-Cl была получена зависимость производительности цикла по водороду и кислороду от расхода топлива, подаваемого на паровой котёл паросилового блока ТЭЦ . Значение расхода пара принималось в интервале Шаг изменяемых параметров был принят: для расхода топлива на паровой котёл .

# заключение

Основной целью курсового проекта являлась разработка математической модели и программного комплекса для анализа и параметрической оптимизации теплотехнической системы. Объектом исследования являлась схема паросиловой турбины ТЭЦ.

На основе расчетной технологической схемы была разработана математическая модель энерготехнологической системы в составе системы из 17 балансовых уравнений. Расчетная технологическая схема включает в себя 10 элементов и 28 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. Выполнены численные исследования термохимической схемы теплофикационной паросиловой установки со встроенной установкой производства водорода в моменты разгрузки блока по электрической мощности. При потреблении 7,75 МВт электрической мощности турбины и 31,4 МВт теплового потока из отбора турбины, мощность потока произведённого водорода составляет 7,6 МВт.
3. Выполненные исследования показали целесообразность применения использования гибридных методов получения водорода в промышленности при использовании высокотемпературных вторичных энергоресурсов и в энергетике для повышения манёвренности энергоблоков. В частности, для создания энерготехнологических установок на базе печи прокатного стана и паросилового блока ТЭЦ.

# 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.
27. Андрющенко А. И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок. - М.: Высшая школа, 1977.
28. Бененсон Е. И., Иоффе Л. С. Теплофикационные паровые турбины. - М.: Энергия, 1976.