

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАЗВИТИЯ КЛАССА ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ .....	6
2 СИНТЕЗ РАСЧЕТНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА .....	9
3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАКРОУРОВНЯ ДЛЯ ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ .....	13
4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РЕАЛИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА БАЗЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА .....	26
4.1 Алгоритм реализации математической модели на базе интегрального метода расчета .....	26
4.2 Результаты расчета .....	27
5 ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ .....	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	29
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	30

## ВВЕДЕНИЕ

В данном курсовом проекте задачей является синтезирование расчётной схемы исследуемого объекта, изучение и построение математической модели макроуровня исследуемой системы, параметрическая оптимизация исследуемой системы с помощью одного из методов многомерной оптимизации.

Тема курсового проекта – «Оценка и перспективы использования альтернативных энергоносителей в Республике Беларусь». В этом курсовом проекте рассматривается возможность хранения и транспортировки водорода в случае его связи с металциклогесна-толуолом.

В ходе проекта проведена следующая работа: оценено состояние класса исследуемой теплотехнической системы, выполнен синтез расчётной исследуемой системы, разработан алгоритм реализации математической модели на базе интегрального методов расчёта, проведено численное исследование системы.

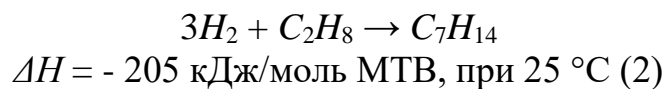
Особое внимание в курсовом проекте было уделено более глубокому изучению методов моделирования технических систем на макроуровне и практике их применения для анализа и оптимизации теплотехнических объектов. Учебный материал, предлагаемый при выполнении курсового проекта, сознательно сконцентрирован на моделировании технических систем. Важно было взглянуть на технический объект именно с точки зрения представления его как системы, т. е. совокупности взаимосвязанных элементов, обладающей свойствами, отличными от свойств отдельных элементов. Это позволило увидеть внутреннее взаимодействие элементов, понять смысл и внутреннюю логику инженерных методик расчета различных теплотехнических установок, научиться составлять алгоритмы подобных расчетов, легче разбираться в логике функционирования в новых технических объектах.

Так же в ходе выполнения курсового проекта был приведен следующий графический материал: технологическая и расчётная структурная схема; граф расчётной матрицы функциональных связей; алгоритмы определения теплофизических свойств теплоносителей и рабочих тел, использованные при реализации математической модели; алгоритмы параметрической оптимизации, результаты исследования.

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАЗВИТИЯ КЛАССА ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ

Нехватка энергии из-за увеличения количества отраслей промышленности, транспортных средств и населения является самой серьезной проблемой во всем мире. Высокий спрос на энергию в конечном итоге приводит к сокращению запасов топлива день ото дня. Обычные электростанции, работающие на ископаемом топливе, производят дорогостоящую электроэнергию с вредными выбросами, что приводит к высоким счетам на импорт в отдельные страны и разрушению окружающей среды. Необходимость решить проблему нехватки энергии с помощью экологически безопасных технологий - самый сложный вопрос.  $H_2$ , являющийся чистым газообразным топливом, может использоваться в качестве экологически чистого топлива в стационарных энергетических установках. Однако для хранения  $H_2$  в газообразной форме или криогенной жидкой форме требуются резервуары высокого давления (70 МПа) или дорогие изолированные резервуары (-253 °C) соответственно. В результате его использование в качестве экологически чистого топлива считается далеким от практической точки зрения из-за его хранения, транспортировки и использования. В настоящее время производство и поставка  $H_2$  на месте привлекают большое внимание, поскольку они могут предоставить практическое решение для производства энергии на основе  $H_2$ .

Система метанциклогесан-толуол-водород (МТВ) – перспективный метод, который может обеспечить практическое решение для производства, хранения и использования  $H_2$  в качестве топлива для электростанций в виде жидких органических гидридов. Он складывается по следующей эндотермической обратимой реакции.



Полная система включает обратимый цикл дегидрирования МТВ и реакции гидрирования для высвобождения и хранения  $H_2$  соответственно. Ранее было предложено множество альтернативных решений для химического хранения  $H_2$  в форме  $NH_3$  и жидких органических носителей водорода (ЛОНС), то есть системы дибензилтолуол, бензилциклогексан и нафталин-декалин. Среди этих систем  $NH_3$  является ядовитым газом, который содержит 17,65 % массовой доли  $H_2$  и ежегодно производится во всем мире более 100 миллионов тонн. Прямое сжигание  $NH_3$  в газовой турбине может привести к выделению ядовитых газов ( $NO$ ) и может отрицательно повлиять на окружающую среду. И наоборот, разложение  $NH_3$  на  $N$  и  $H_2$  является безуглеродной обратимой и эндотермической реакцией. Многие исследователи предложили разложение  $NH_3$  для производства  $H_2$  с катализатором и без него в различных реакторах,

например, в реакторе с неподвижным слоем, мембранном реакторе с одним неподвижным слоем и многоступенчатом мембранном реакторе. Однако для эффективного разложения  $NH_3$  требуется реакторная система с низким давлением, но с высокой температурой. С другой стороны, чрезмерная температура разрушительно влияет на реактор и катализатор. Более того, высокая стоимость катализатора ограничивает практическое использование реакторов с неподвижным слоем для разложения  $NH_3$ . И наоборот, помимо высокой стоимости обслуживания мембранных реакторов, снижение температуры по длине реактора оказывает отрицательное влияние на кинетику реакции разложения  $NH_3$  и, таким образом, ограничивает практическое использование  $NH$  в качестве энергоносителя. МТВ система содержит 6-8%  $H_2$ . Жидкая фаза системы метанциклогесан-водорода (МЦВ) и толуола в широком диапазоне температур делает ее подходящей для длительного хранения  $H_2$ . Более низкая температура кипения МЦВ (101 °C) и толуола (111 °C), чем нафталин, декалин, дибензилтолуол и бензилтолуол, дает МТВ преимущество перед другими технологиями хранения  $H_2$ . Таким образом, МТВ является практически применимым и теоретически перспективным методом для хранения  $H_2$  в промышленных масштабах. Идея МТВ для сезонного хранения энергии в форме химически связанного  $H_2$  была впервые предложена Шерером. Он сообщил, что она конкурентоспособна с новыми гидроэнергетическими проектами. Применение МТВ-системы для бортового использования  $H_2$  показало, что гибридная система МТВ-бензин может быть практическим решением двигателя внутреннего сгорания, работающего на  $H_2$ . Использование системы МТВ для производства электроэнергии, мощностью 100 МВт, на электростанции с парогазовым циклом достигает значения энергетического КПД в 50,2%. С другой стороны, гидрогенизация системы МТВ и стоимость производимой электроэнергии не обсуждались. Сообщалось о разработке электростанции с парогазовым циклом, работающей на  $H_2$ , с различными установками для подачи чистого  $H_2$ , но производство водорода не обсуждалось. Влияние давления в конденсаторе, температуры и давления на входе в газовую турбину на эффективность реакции дегидрирования МЦГ выявило существенное влияние на общую эффективность системы. Однако основное внимание уделялось дегидрированию системы МТВ и сравнению с системой, основанной на циклах Граца. Позже было исследовано дегидрирование МЦГ в  $H_2$  с использованием микроструктурированного прототипа мембранного реактора при 350-400 °C и давлении 7-13 бар. Комплексная концепция производства  $H_2$  из низкосортного угля и химического хранения в форме МЦГ путем гидрирования толуола выявила перспективную технологию хранения  $H_2$  и производства энергии. Однако часть дегидрирования системы МТВ не обсуждалась. Недавно было опубликовано исследование, основанное на моделировании системы МТВ для маломасштабного производства электроэнергии с использованием различных каталитических и кинетических данных. Однако основным направлением исследований было производство  $H_2$  в топливных элементах с использованием процессов гидрирования и дегидрирования с замкнутым циклом. Тем не

менее, потребность в энергии реактора дегидрирования была достигнута за счет экзотермической реакции гидрирования, и влияние электростанции с парогазовым циклом не обсуждалось. В настоящем исследовании устраняются пробелы в исследованиях, присутствующие в уже опубликованных работах, и сообщается о новом устойчивом дизайне и моделировании, основанном на исследовании выработки энергии на водородном топливе с использованием системы МТВ. Основная проблема, возникающая при дегидрировании МТВ, заключается в том, что оно является сильно эндотермическим ( $350^{\circ}\text{C}$ ) по своей природе. При этом потребность в тепловой энергии основного реактора дегидрирования обеспечивалась энергией отходящих дымовых газов турбины по новой схеме. Были рассмотрены различные варианты силовой установки, работающей на  $\text{H}_2$ -топливе, с использованием системы МТВ, и подробно обсуждено влияние различных параметров на эффективность производства энергии на основе системы МТВ. Насколько известно, не сообщается о каких-либо работах по производству электроэнергии на основе системы МТВ для крупномасштабной промышленной газовой турбины (266 МВт). Было исследовано влияние электростанции с комбинированным циклом на тепловую интеграцию всей системы и рассчитана стоимость произведенной электроэнергии. Подробно обсуждалось влияние рециркулирующего потока  $\text{H}_2$  на реактор дегидрирования МТВ и выработку электроэнергии. Кроме того, впервые обсуждалось влияние отношения топливно-воздушного эквивалента на выходную мощность и его влияние на производительность системы МТВ. Экономический анализ представляет практическую перспективу применения и сравнения системы МТВ с прежними технологиями производства электроэнергии [9].

Водород в виде жидкого метилциклогексана (МЦГ), который получают из толуола и водорода, можно безопасно и экономично хранить и транспортировать. И толуол, и МЦГ поддерживаются в жидком состоянии при температуре и давлении окружающей среды. МЦГ обычно используется в качестве растворителя, например, в ленте для коррекции белизны, и имеет низкую степень риска как химическое вещество. Используя метод ОХГ с МЦГ, водород в жидкости можно хранить и транспортировать в сжатом объеме примерно в 500 раз меньше объема водорода при температуре и давлении окружающей среды.

Водород подается потребителям после того, как он каталитически извлекается из МЦГ посредством процесса дегидрирования. Толуол, побочный продукт процесса выделения водорода, повторно используется в качестве сырья для производства МЦГ.

## **2 СИНТЕЗ РАСЧЕТНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА**

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, сформирована его расчетная технологическая схема. Для реализации каждой стадии технологического процесса подобран один или несколько технических элементов.

После определения состава технологических элементов установил и уточнил связи между ними по потокам вещества и энергии. Определил 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 использованы 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 характеризуется 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.

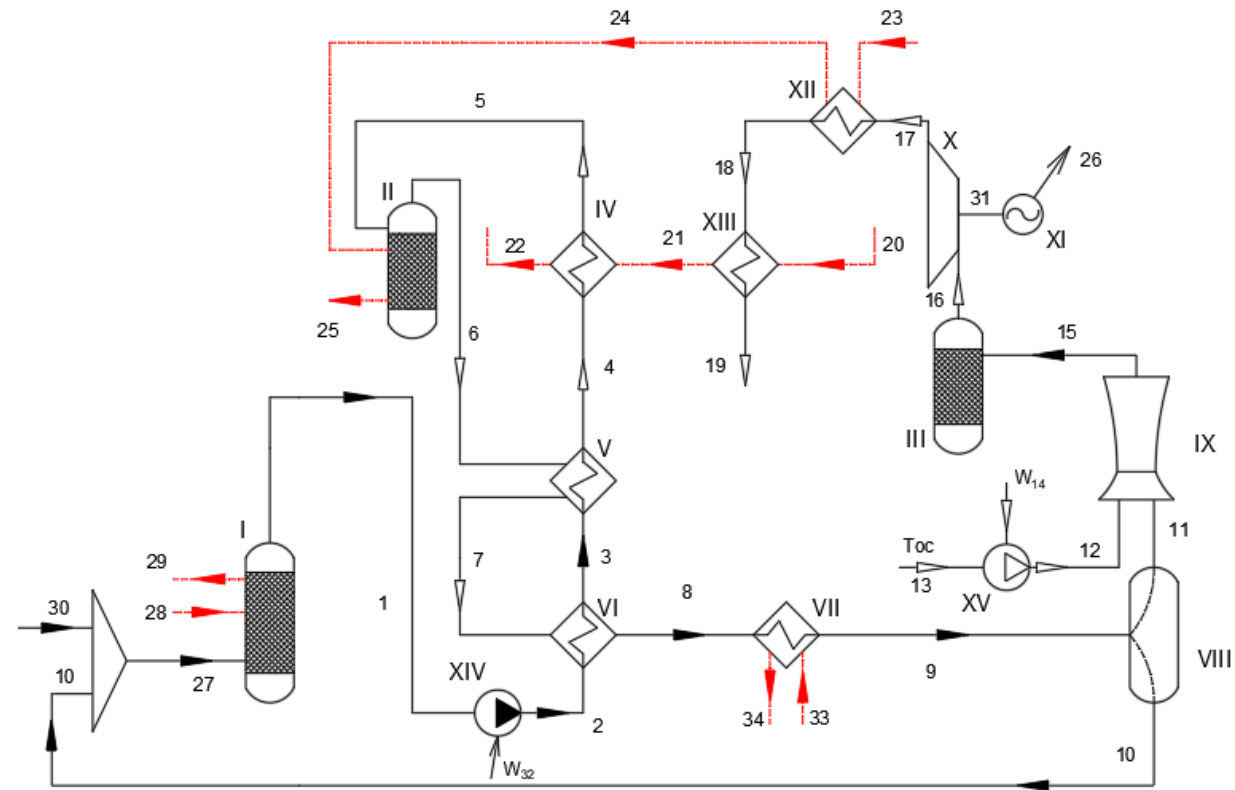
После построения структуры системы и определения состава в нее входящих элементов оценил сложность расчетной схемы и определил уровень глубины исследования.

Обычно на предварительной стадии разработки теплотехнических систем можно не учитывать потери энергии и вещества в транспортных потоках, поэтому связи между элементами рассматриваются как чисто

информационные. При более детальной проработке расчетная схема усложняется: при этом каждую связь можно рассматривать как комбинацию с фиктивным дискретным в пространстве элементом, к которому относят потери энергии и (или) вещества в транспортном соединении. С другой стороны, чтобы не усложнять математическую модель, можно эти потери отнести к соответствующим элементам, количественно учитывая их в уравнениях баланса через коэффициенты потерь энергии и вещества в окружающую среду [2].

Расчетную технологическую схему промышленно-отопительной котельной представим в графической части. Отметим, что схема включает 15 элементов и 34 связи (рисунок 1.1).

Опишем потоки, имеющиеся в теплотехнической системе:



I – реактор гидрирования; II – реактор дегидрирования; III – камера сгорания; IV – перегреватель; V – испаритель; VI – промежуточный подогреватель (конденсатор); VII - охладитель продукта; VIII – разделитель продукта; IX – нагнетатель; X – турбина; XI – генератор; XII – котел-утилизатор; XIII – охладитель продуктов сгорания; XIV – насос; XV – компрессор

Рисунок 2.1 – Расчётная схема использования водорода

- 1 – поток метанциклогексан-толуол-водорода (МТВ), образовавшегося в реакторе гидрирования;
- 2 – поток МТВ, сжатый в насосе;
- 3 – поток МТВ, нагретый в промежуточном подогревателе;

- 4 – поток МТВ, нагретый в испарителе;
- 5 – поток МТВ, идущий в реактор дегидрирования;
- 6 – поток МТВ, после реактора дегидрирования;
- 7 – поток МТВ, охлажденный в испарителе;
- 8 – поток МТВ, сконденсированный в конденсаторе;
- 9 – поток МТВ, после охладителя продукта;
- 10 – поток метанциклогексан-толуола после разделителя смеси;
- 11 – поток водорода после разделителя смеси;
- 12 – поток воздуха, сжатого в компрессоре;
- 13 – поток воздуха с окружающей среды;
- 14 – электроэнергия на привод компрессора;
- 15 – поток смеси водород-воздух;
- 16 – поток продуктов сгорания после камеры сгорания;
- 17 – поток продуктов сгорания после турбины;
- 18 – поток продуктов сгорания после котла-утилизатора;
- 19 – поток уходящих продуктов сгорания;
- 20 – поток воздуха на охлаждение продуктов сгорания;
- 21 – поток воздуха, нагретый в охладителе продуктов сгорания;
- 22 – поток воздуха после перегревателя;
- 23 – поток воды в котел-утилизатор;
- 24 – поток водяного пара после котла-утилизатора;
- 25 – поток водяного пара после реактора дегидрирования;
- 26 – поток вырабатываемой в генераторе электроэнергии;
- 27 – поток смеси водорода и метанциклогексан-толуола, идущий в реактор гидрирования;
- 28, 29 – поток теплоносителя, нагреваемого в реакторе гидрирования;
- 30 – поток исходного водорода;
- 31 – механическая энергия от турбины;
- 32 – электроэнергия на привод насоса;
- 33, 34 – поток теплоносителя, для охлаждения МТВ в охладителе продукта.

Водород, получаемый в топливном элементе за пределами исследуемой схемы, поступает в реактор гидрирования (I) вместе со смесью метанциклогексан-толуол.

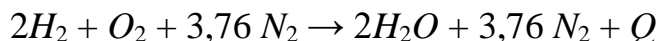
Смесь, полученная в реакторе гидрирования, с помощью насоса (XIV) перекачивается в подогреватель (VI), где нагревается до температуры около 190 °С. Нагрев осуществляется за счет передачи теплоты от горячего источника (продукт, полученный в реакторе дегидрирования). Далее она поступает в испаритель (V), где нагревается до 272 °С, охлаждая при этом продукт, полученный в реакторе дегидрирования (II). После испарителя МТВ поступает в перегреватель (IV), где достигает температуры в 350 °С.

В разделителе (VIII) происходит процесс получения водорода, путем его выделения из смеси метанциклогексан-толуол-водород. Водород, полученный в VIII, идет на горение. Для осуществления процесса горения в смеситель (IX) поступает воздух, предварительно нагнетаемый в компрессоре (XV) до



$\approx 60$  бар. Смесь водород-воздух поступает в камеру сгорания (III), где и происходит процесс сгорания водорода.

Реакция горения водорода указана ниже:



В результате горения водорода, продуктом реакции является водяной пар  $H_2O$ . Водяной пар, полученный в результате горения водорода, поступает в паровую турбину (X), где расширяется до 22 бар. В турбине пар приводит в движение лопатки турбины, которые в свою очередь заставляют вращаться вал, на котором расположена турбина. При вращении лопаток вырабатывается механическая энергия, которую использует генератор (XI), для производства электроэнергии.

Водяной пар, выходящий из турбины, поступает в котел-утилизатор (XII), происходит получение водяного пара для привода реактора дегидрирования. В КУ водяной пар, полученный при сгорании водорода, охлаждается до  $\approx 364$  °С и с такой температурой поступает в охладитель дымовых газов (XIII), где охлаждается до  $\approx 238$  °С.

Таким образом, использование МТЦ для транспортировки и хранения водорода является перспективным способом решения текущих проблем, связанных с использованием водорода. Созданная инфраструктура транспорта и хранения может быть пригодна для МТВ. Данный фактор является одним из самых существенных при выборе альтернативных видов топлива.

### 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАКРОУРОВНЯ ДЛЯ ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ

Математическая модель исследуемого объекта представлена в виде совокупности математического описания структуры системы, системы балансовых уравнений элементов системы, системы ограничений на параметры и функции цели. Графически структуру и связи элементов в модели представлена с помощью графа.

Графом в общем случае принято считать совокупность отрезков произвольной длины и формы, называемых дугами, и точек пересечения дуг, называемых вершинами. Использование теории графов позволяет осуществить математически строгое и достаточно наглядное рассмотрение структуры технологической схемы. Расчетная технологическая схема исследуемой системы представлена в виде ориентированного (направленного) потокового графа в графической части проекта [2].

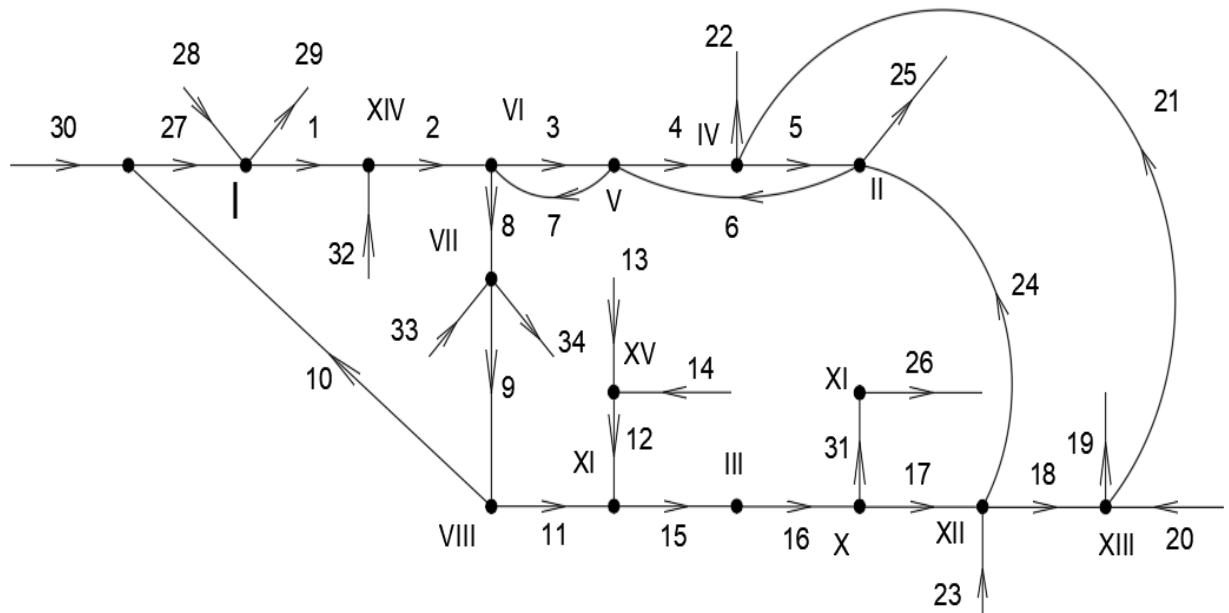


Рисунок 3.1 – Ориентированный граф технической системы

Для решения поставленной задачи достаточно проанализировать сокращенную систему балансовых уравнений, состоящую только из уравнений энергетических и материальных балансов. При этом считаем, что известны зависимости или алгоритмы определения энтальпий теплоносителей и рабочих тел в виде функций от термодинамических параметров.

После получения изображения графа выполнил его кодирование с использованием структурной матрицы (таблица 3.1) и матрицы видов связей (таблица 3.2). Для этого предварительно вершины и дуги графа пронумеровал. Для обозначения вершин использованы римские цифры, для дуг – арабские.

Таблица 3.1 – Структурная матрица

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	$\Sigma$
1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
3	0	0	0	0	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	+1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	-1	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	-1	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	-1	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	+1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	+1
15	0	0	+1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	+1	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	+1	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	+1
21	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
22	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	0	+1
24	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
25	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1
29	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	+1
33	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	+1
34	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
$\Sigma$	4	4	3	4	4	3	4	3	3	3	2	4	4	3	3	

Таблица 3.2 – Матрица видов связи

МАТРИЦА ВИДОВ СВЯЗЕЙ										
	Вода	Воздух	ПС	ВД	МТВ	МГТ	ЭЭ	МЭ		
1	0	0	0	0	1	0	0	0		
2	0	0	0	0	1	0	0	0		
3	0	0	0	0	1	0	0	0		
4	0	0	0	0	1	0	0	0		
5	0	0	0	0	1	0	0	0		

Продолжение таблицы 3.2

6	0	0	0	0	1	0	0	0	
7	0	0	0	0	1	0	0	0	
8	0	0	0	0	1	0	0	0	
9	0	0	0	0	1	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	1	0	0	
11	0	0	0	1	0	0	0	0	
12	0	1	0	0	0	0	0	0	
13	0	1	0	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0	0	1	0	
15	0	0	1	0	0	0	0	0	
16	0	0	1	0	0	0	0	0	
17	0	0	1	0	0	0	0	0	
18	0	0	1	0	0	0	0	0	
19	0	0	1	0	0	0	0	0	
20	0	1	0	0	0	0	0	0	
21	0	1	0	0	0	0	0	0	
22	0	1	0	0	0	0	0	0	
23	1	0	0	0	0	0	0	0	
24	1	0	0	0	0	0	0	0	
25	1	0	0	0	0	0	0	0	
26	0	0	0	0	0	0	1	0	
27	0	0	0	0	1	0	0	0	
28	1	0	0	0	0	0	0	0	
29	1	0	0	0	0	0	0	0	
30	0	0	0	1	0	0	0	0	
31	0	0	0	0	0	0	0	1	
32	0	0	0	0	0	0	1	0	
33	0	1	0	0	0	0	0	0	
34	0	1	0	0	0	0	0	0	
m	3	4	4	3	4	4	1	1	
$\Sigma$	5	7	5	2	10	1	3	1	
m· $\Sigma$	15	28	20	6	40	3	3	1	116

Единица в  $ij$ -м элементе структурной матрицы (таблица 3.1) дает логический признак, означающий, что из  $j$ -го элемента системы выходит «-» или в него входит «+»  $i$ -я связь. При этом строка, соответствующая связи с внешними системами (внешняя связь), имеет один ненулевой член («-1» – для исходящих и «+1» – для входящих внешних связей системы), а строка, соответствующая внутренней связи, имеет две единицы, в сумме дающие нуль. Это отражается в последнем столбце таблицы, ячейки которой содержат сумму соответствующей строки матрицы. Структурная матрица, которую также называют матрицей соединений, полностью отображает структуру графа технологической схемы системы и позволяет перевести ее на математический язык, что имеет важное значение автоматизации процесса моделирования.

Единицы в  $j$ -х столбцах матрицы видов связей (таблица 3.2) по энергоносителям дают логический признак вида  $j$ -го энергоносителя, посредством которого осуществляется  $i$ -я связь.

По признаку вида энергоносителя выбираются соответствующие уравнения параметров состояния и характеристик процессов. Все параметры и зависимости между ними рассматриваются соответственно, как переменные и функции, заданные на графе.

Матрица смежности (таблица 3.3) показывает наличие связей между элементами. строки и столбы обозначают номера элементов схемы. Наличие единицы в  $ij$ -м элементе матрицы смежности обозначает, что в схеме имеется связь, выходящая из  $i$ -го элемента и входящая в  $j$ -й элемент, наличие нулевой строки, – что из данного элемента не выходит ни одна связь, входящая в другой элемент схемы. Наличие нулевого столбца обозначает, что в данный элемент не входит ни одна связь из других элементов схемы. В обоих указанных случаях это обозначает, что данные элементы не входят ни в один из контуров схемы. Напомним, что под контуром понимается замкнутая цепочка элементов, т. е. выйдя из одного из них, вы по соединительным связям можете в него возвратиться. Это означает, что все элементы, входящие в контур, имеют обратную связь [2].

Для каждого элемента системы записываются следующие уравнения:

- баланса энергии для  $k$ -го элемента (3.1):

$$\sum_{j=1}^{N_k} (\gamma \cdot G \cdot h)_j + \sum_{n=1}^{P_k} (\gamma \cdot E)_n = 0; \quad (3.1)$$

- материального баланса для  $i$ -го энергоносителя в  $k$ -м элементе (3.2):

$$\sum_{j=1}^{N_{ki}} G_j = 0; \quad (3.2)$$

- изменения давления  $i$ -го энергоносителя в  $k$ -м элементе (3.3):

$$(p' \pm \Delta p - p'')_{ki} = 0; \quad (3.3)$$

- изменения энтальпии  $i$ -го энергоносителя в  $k$ -м элементе (3.4):

$$(h' \pm \Delta h - h'')_{ki} = 0; \quad (3.4)$$

Здесь:

$G$  – расход энергоносителя;

$E$  – мощность электрической или механической связи;

$p$  – давление энергоносителя исходящей (‘’) или входящей (‘) связи элемента;

$h$  – энтальпия энергоносителя исходящей (‘’) или входящей (‘) связи элемента;

$\Delta p$  – изменение давления соответствующих теплоносителей в элементах;

$\Delta h$  – изменение энтальпии соответствующих теплоносителей в элементах;

$\gamma$  – коэффициент, учитывающий потери связывающего потока в окружающую среду.

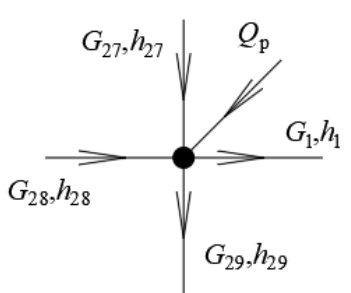
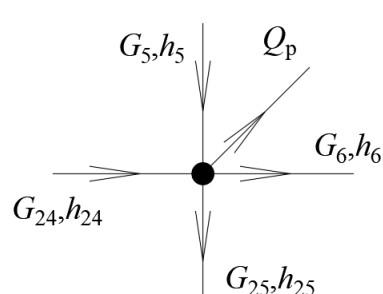
$N$  и  $P$  – число трехпараметрических и однопараметрических связей.

Слагаемые, определяющие потоки, входящие в элемент, в уравнениях записываются как положительные «+», выходящие – как отрицательные «-».

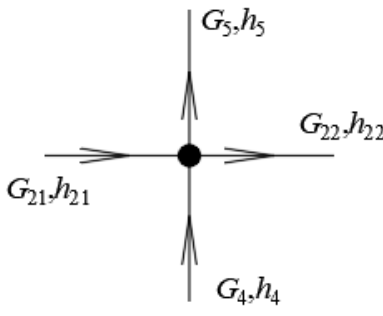
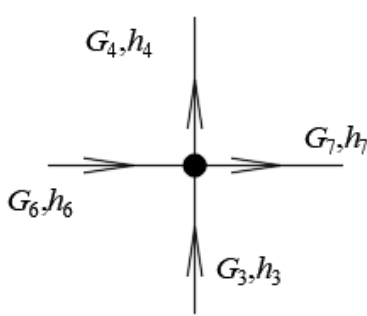
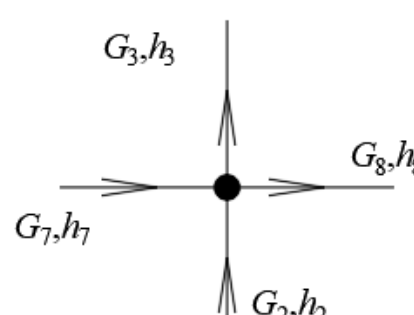
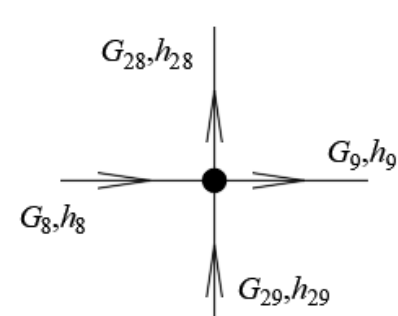
После составления системы балансовых уравнений (таблица 3.3) производится анализ функциональных связей ее параметров [2].

При анализе системы определяем количество и состав характеризующих ее информационных переменных, а именно необходимо знать состав и количество зависимых, независимых переменных и количество уравнений математических моделей, необходимых для описания системы (таблица 3.4).

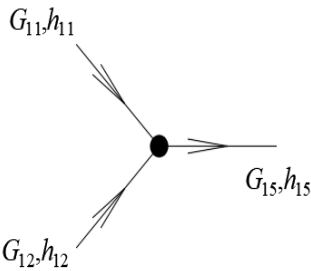
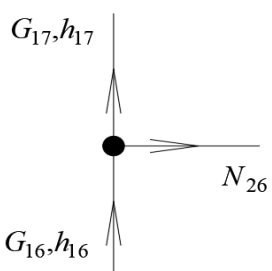
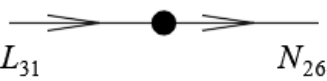
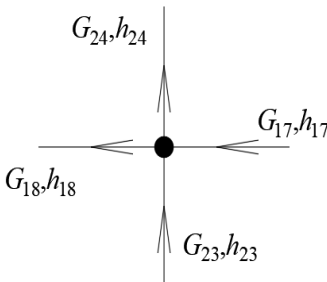
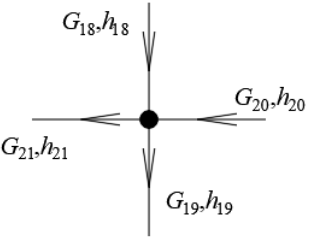
Таблица 3.3 – Системы балансовых уравнений

№ элемента (название)	Обозначение элемента шрифт на схеме	Балансовые уравнения
1	2	3
I	 <p>(Реактор гидрирования)</p>	$G_{27} - G_1 = 0;$ $G_{28} - G_{29} = 0;$ $\gamma_1 G_{27} h_{27} + G_{28} h_{28} - G_1 h_1 - G_{29} h_{29} - Q_p = 0;$
II	 <p>(Реактор дегидрирования)</p>	$G_5 - G_6 = 0;$ $G_{24} - G_{25} = 0;$ $\gamma_2 G_5 h_5 + G_{24} h_{24} - G_6 h_6 - G_{25} h_{25} + Q_p = 0;$

Продолжение таблицы 3.3

1	2	3
IV (II)	 <p>(Перегреватель)</p>	$G_4 - G_5 = 0;$ $G_{21} - G_{22} = 0;$ $\gamma_4 G_{21} h_{21} + G_4 h_4 - G_5 h_5 - G_{22} h_{22} = 0;$
V	 <p>(Испаритель)</p>	$G_3 - G_4 = 0;$ $G_6 - G_7 = 0;$ $\gamma_5 G_6 h_6 + G_3 h_3 - G_4 h_4 - G_7 h_7 = 0;$
VI	 <p>(Промежуточный подогреватель)</p>	$G_2 - G_3 = 0;$ $G_7 - G_8 = 0;$ $\gamma_6 G_7 h_7 + G_2 h_2 - G_8 h_8 - G_3 h_3 = 0;$
VII	 <p>(Охладитель продукта)</p>	$G_8 - G_9 = 0;$ $G_{29} - G_{28} = 0;$ $\gamma_7 G_8 h_8 + G_{29} h_{29} - G_9 h_9 - G_{28} h_{28} = 0;$

## Продолжение таблицы 3.3

1	2	3
<i>IX</i>	 <p style="text-align: center;">()</p>	$G_{11} + G_{12} - G_{15} = 0;$ $\gamma_9 G_{11} h_{11} - G_{12} h_{12} - G_{15} h_{15} = 0;$
<i>X</i>	 <p style="text-align: center;">(Турбина)</p>	$G_{16} - G_{17} = 0;$ $G_{16} h_{16} - G_{17} h_{17} - N_{26} / \gamma_{10} = 0;$
<i>XI</i>	 <p style="text-align: center;">(Генератор)</p>	$L - N_{26} / \gamma_{10} = 0;$
<i>XII</i>	 <p style="text-align: center;">(Котел-утилизатор)</p>	$G_{17} - G_{18} = 0;$ $G_{23} - G_{24} = 0;$ $\gamma_{12} G_{17} h_{17} + G_{23} h_{23} - G_{18} h_{18} - G_{24} h_{24} = 0;$
<i>XIII</i>	 <p style="text-align: center;">(Охладитель продуктов сгорания)</p>	$G_{18} - G_{19} = 0;$ $G_{20} - G_{21} = 0;$ $\gamma_{13} G_{18} h_{18} + G_{20} h_{20} - G_{19} h_{19} - G_{21} h_{21} = 0;$



## Окончание таблицы 3.3

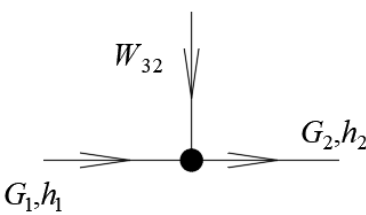
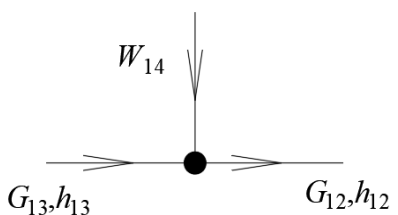
1	2	3
XIV	 <p>(Насос)</p>	$G_1 - G_2 = 0;$ $G_1 h_1 + \gamma_{14} W_{32} - G_2 h_2 = 0;$
XV	 <p>(Компрессор)</p>	$G_{13} - G_{12} = 0;$ $G_{13} h_{13} + \gamma_{15} W_{14} - G_{12} h_{12} = 0;$

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 – Метанциклогексан-толуол-водорода (МТВ), образовавшегося в реакторе гидрирования					
1	Расход	кг/с	$G_1$	0...	Зависим.
2	Температура	°С	$t_1$	20...35	Реглам.
3	Давление	МПа	$p_1$	0...	Реглам.
4	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_1$	$f(t_1, c_1)$	Зависим.
Связь 2 – МТВ, сжатый в насосе					
5	Расход	кг/с	$G_2$	0...	Зависим.
6	Температура	°С	$t_2$	10...15	Реглам.
7	Давление	МПа	$p_2$	1...10	Реглам.
8	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_2$	$f(t_2, c_2)$	Зависим.
Связь 3 – МТВ, нагретый в промежуточном подогревателе					
9	Расход	кг/с	$G_3$	0...	Зависим.
10	Температура	°С	$t_3$	100...250	Зависим.
11	Давление	МПа	$p_3$	1...10	Зависим.
12	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_3$	$f(t_3, c_3)$	Зависим.
Связь 4 – МТВ, нагретый в испарителе;					
13	Расход	кг/с	$G_4$	0...	Зависим.
14	Температура	°С	$t_4$	200...300	Управл.
15	Давление	МПа	$p_4$	1...10	Зависим.
16	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_4$	$f(t_4, c_4)$	Зависим.
Связь 5 – МТВ, идущий в реактор дегидрирования;					
17	Расход	кг/с	$G_5$	0...	Зависим.
18	Температура	°С	$t_5$	320...380	Зависим.
19	Давление	МПа	$p_5$	1...10	Зависим.

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5	6
20	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_5$	$f(t_5, c_5)$	Зависим.
Связь 6 – МТВ, после реактора дегидрирования					
21	Расход	кг/с	$G_6$	0...	Зависим.
22	Температура	°С	$t_6$	320...380	Зависим.
23	Давление	МПа	$p_6$	1...10	Зависим.
24	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_6$	$f(t_6, c_6)$	Зависим.
Связь 7 – МТВ, охлажденный в испарителе					
25	Расход	кг/с	$G_7$	0...	Зависим.
26	Температура	°С	$t_7$	220...280	Реглам.
27	Давление	МПа	$p_7$	1...10	Реглам.
28	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_7$	$f(t_7, c_7)$	Зависим.
Связь 8 – поток МТВ, сконденсированный в конденсаторе					
25	Расход	кг/с	$G_8$	0...	Зависим.
26	Температура	°С	$t_8$	100...200	Управл.
27	Давление	МПа	$p_8$	1...10	Реглам.
28	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_8$	$f(t_8, c_8)$	Зависим.
Связь 9 – МТВ, после охладителя продукта					
29	Расход	кг/с	$G_9$	0...	Зависим.
30	Температура	°С	$t_9$	25...30	Управл.
31	Давление	МПа	$p_9$	1...10	Зависим.
32	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_9$	$f(t_9, c_9)$	Зависим.
Связь 10 – метанциклогексан-толуола после разделителя смеси					
33	Расход	кг/с	$G_{10}$	0...	Зависим.
34	Температура	°С	$t_{10}$	25...30	Управл.
35	Давление	МПа	$p_{10}$	1...10	Реглам.
36	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{10}$	$f(t_{10}, c_{10})$	Зависим.
Связь 11 – водорода после разделителя смеси					
37	Расход	кг/с	$G_{11}$	1	Управл.
38	Температура	°С	$t_{11}$	25...30	Управл.
39	Давление	МПа	$p_{11}$	1...10	Зависим.
40	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{11}$	$f(t_{11}, c_{11})$	Зависим.
Связь 12 – поток воздуха, сжатого в компрессоре					
41	Расход	кг/с	$G_{12}$	0...	Зависим.
42	Температура	°С	$t_{12}$	20...	Зависим.
43	Давление	МПа	$p_{12}$	1...	Зависим.
44	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{12}$	$f(t_{12}, p_{12})$	Зависим.
Связь 13 – поток воздуха с окружающей среды					
45	Расход	кг/с	$G_{13}$	0...	Зависим.
46	Температура	°С	$t_{13}$	-40...50	Зависим.
47	Давление	МПа	$p_{13}$	1	Зависим.
48	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{13}$	$f(t_{13}, p_{13})$	Зависим.
Связь 14 – электроэнергия на привод компрессора					
49	Электроэнергия	кг/с	$W_{14}$	0...	Зависим.
Связь 15 – поток смеси водород-воздух					
50	Расход	кг/с	$G_{15}$	0...	Зависим.
51	Температура	°С	$t_{15}$	70...90	Зависим.
52	Давление	МПа	$p_{15}$	0...	Зависим.
53	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{15}$	$f(t_{15}, p_{15})$	Зависим.

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5	6
Связь 16 – поток продуктов сгорания после камеры сгорания					
54	Расход	кг/с	$G_{16}$	0...	Зависим.
55	Температура	°С	$t_{16}$	100...1800	Управл.
56	Давление	МПа	$p_{16}$	1...	Зависим.
57	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{16}$	$f(t_{16}, p_{16})$	Зависим.
Связь 17 – поток продуктов сгорания после турбины					
58	Расход	кг/с	$G_{17}$	0...	Зависим.
59	Температура	°С	$t_{17}$	320...1000	Управл.
60	Давление	МПа	$p_{17}$	1...	Зависим.
61	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{17}$	$f(t_{17}, p_{17})$	Зависим.
Связь 18 – поток продуктов сгорания после котла-утилизатора					
62	Расход	кг/с	$G_{18}$	0...	Зависим.
63	Температура	°С	$t_{18}$	320...1000	Управл.
64	Давление	МПа	$p_{18}$	0...	Зависим.
65	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{18}$	$f(t_{18}, p_{18})$	Зависим.
Связь 19 – поток уходящих продуктов сгорания					
66	Расход	кг/с	$G_{19}$	0...	Зависим.
67	Температура	°С	$t_{19}$	0...	Управл.
68	Давление	МПа	$p_{19}$	0...	Зависим.
69	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{19}$	$f(t_{19}, p_{19})$	Зависим.
Связь 20 – поток воздуха на охлаждение продуктов сгорания					
70	Расход	кг/с	$G_{20}$	0...	Зависим.
71	Температура	°С	$t_{20}$	20	Реглам.
72	Давление	МПа	$p_{20}$	0...	Реглам.
73	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{20}$	$f(t_{20}, p_{20})$	Зависим.
Связь 21 – поток воздуха, нагретый в охладителе продуктов сгорания					
74	Расход	кг/с	$G_{21}$	0...	Зависим.
75	Температура	°С	$t_{21}$	0...	Управл.
76	Давление	МПа	$p_{21}$	0...	Зависим.
77	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{21}$	$f(t_{21}, p_{21})$	Зависим.
Связь 22 – поток воздуха после перегревателя					
78	Расход	кг/с	$G_{22}$	0...	Зависим.
79	Температура	°С	$t_{22}$	0...	Управл.
80	Давление	МПа	$p_{22}$	0...	Зависим.
81	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{22}$	$f(t_{22}, p_{22})$	Зависим.
Связь 23 – поток воды в котел-утилизатор					
82	Расход	кг/с	$G_{23}$	0...	Зависим.
83	Температура	°С	$t_{23}$	0...	Зависим.
84	Давление	МПа	$p_{23}$	0...	Зависим.
85	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{23}$	$f(t_{23}, p_{23})$	Зависим.
Связь 24 – поток водяного пара после котла-утилизатора					
86	Расход	кг/с	$G_{24}$	0...	Зависим.
87	Температура	°С	$t_{24}$	0...	Зависим.
88	Давление	МПа	$p_{24}$	0...	Зависим.
89	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{24}$	$f(t_{24}, p_{24})$	Зависим.
Связь 25 – поток водяного пара после реактора дегидрирования					
90	Расход	кг/с	$G_{25}$	0...	Зависим.
91	Температура	°С	$t_{25}$	0...	Зависим.

## Окончание таблицы 3.4

1	2	3	4	5	6
92	Давление	МПа	$p_{25}$	0...	Зависим.
93	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{25}$	$f(t_{25}, p_{25})$	Зависим.
Связь 26 – поток вырабатываемой в генераторе электроэнергии					
94	Электроэнергия	кг/с	$W_{14}$	0...	Зависим.
Связь 27 – поток смеси водорода и метанциклогексан-толуола, идущий в реактор гидрирования					
95	Расход	кг/с	$G_{26}$	0...	Зависим.
96	Температура	°С	$t_{26}$	0...	Управл.
97	Давление	МПа	$p_{26}$	0...	Зависим.
98	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{26}$	$f(t_{26}, p_{26})$	Зависим.
Связь 28 – поток теплоносителя, нагреваемого в реакторе гидрирования					
97	Расход	кг/с	$G_{26}$	0...	Зависим.
98	Температура	°С	$t_{26}$	0...	Управл.
99	Давление	МПа	$p_{26}$	0...	Зависим.
100	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{26}$	$f(t_{26}, p_{26})$	Зависим.
Связь 29 – поток теплоносителя, нагреваемого в реакторе гидрирования					
97	Расход	кг/с	$G_{26}$	0...	Зависим.
98	Температура	°С	$t_{26}$	0...	Управл.
99	Давление	МПа	$p_{26}$	0...	Зависим.
100	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{26}$	$f(t_{26}, p_{26})$	Зависим.
Связь 30 – поток исходного водорода					
97	Расход	кг/с	$G_{26}$	0...	Зависим.
98	Температура	°С	$t_{26}$	0...	Управл.
99	Давление	МПа	$p_{26}$	0...	Зависим.
100	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{26}$	$f(t_{26}, p_{26})$	Зависим.
Связь 31 – механическая энергия от турбины					
102	Мощность	кВт	$L_{31}$	0...	Зависим.
Связь 32 – электроэнергия на привод насоса					
102	Мощность	кВт	$W_{32}$	0...	Зависим.
Связь 33 – поток теплоносителя, для охлаждения МТВ в охладителе продукта					
97	Расход	кг/с	$G_{33}$	0...	Зависим.
98	Температура	°С	$t_{33}$	0...	Управл.
99	Давление	МПа	$p_{33}$	0...	Зависим.
100	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{33}$	$f(t_{26}, p_{26})$	Зависим.
Связь 34 – поток теплоносителя, для охлаждения МТВ в охладителе продукта					
97	Расход	кг/с	$G_{34}$	0...	Зависим.
98	Температура	°С	$t_{34}$	0...	Управл.
99	Давление	МПа	$p_{34}$	0...	Зависим.
100	Энтальпия	кДж/(кг·°С)	$h_{34}$	$f(t_{26}, p_{26})$	Зависим.

Из уравнений следует, что следующие параметры равны:

$$G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = G_5 = G_6 = G_7 = G_8 = G_9 = G_{27};$$

$$G_{12} = G_{13};$$

$$G_{15} = G_{16} = G_{17} = G_{18} = G_{19};$$

$$G_{20} = G_{21} = G_{22};$$

$$G_{23} = G_{24} = G_{25};$$

$$\begin{aligned} G_{28} &= G_{29}; \\ G_{11} &= G_{30}; \\ G_{33} &= G_{34}. \end{aligned}$$

Неизвестные системы представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Неизвестные параметры математической модели

1	2	3
$G_1$ $G_{11}$ $G_{12}$ $G_{15}$ $G_{20}$ $G_{23}$ $G_{28}$ $G_{33}$	$h_{12д}$ $h_{17д}$	$W_{14}$ $W_{26}$ $L_{31}$ $W_{32}$
всего: 8	всего: 2	всего: 4

Расход воздуха, поступающего в систему, рассчитывался по формуле:

$$G_{12} = \alpha \cdot G_{во} \cdot G_{11}, \text{ кг/с.} \quad (3.5)$$

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

$$T_{12д} = T_{13} \left( 1 + \frac{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{oi}^k} \right), \text{ К.} \quad (3.6)$$

Для определения энтальпии продуктов сгорания после турбины использовалась формула [21]:

$$i_{17д} = i_{15} - (i_{15} - i_{17}) \cdot \eta_{oi}^T, \text{ К.} \quad (3.7)$$

Для определения количества электроэнергии, вырабатываемой на генераторе турбины используется формула [21]:

$$W_{26} = L_{31} \cdot \eta_{эм}, \text{ К.} \quad (3.7)$$

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

$$h_{12д} = T_{13} \left( 1 + \frac{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{oi}^k} \right) \cdot \overline{c_p} \big|_0^{T_{12д}};$$

$$\begin{aligned}
G_{12} &= \alpha \cdot G_{\text{Bo}} \cdot G_{11}; \\
G_{15} &= G_{12} + G_{11}; \\
W_{14} &= G_{12} \cdot (h_{12\text{д}} - h_{13}); \\
i_{17\text{д}} &= i_{15} - (i_{15} - i_{17}) \cdot \eta_{oi}^{\text{T}}; \\
L_{14} &= G_{12} \cdot (h_{15} - h_{17\text{д}}); \\
W_{26} &= L_{31} \cdot \eta_{\text{ЭМ}}; \\
G_{23} &= \frac{G_{15} \cdot (h_{17\text{д}} - h_{18})}{h_{24} - h_{23}}; \\
G_{20} &= \frac{G_{15} \cdot (h_{18} - h_{19})}{h_{21} - h_{20}}; \\
G_1 &= \frac{G_{20} \cdot (h_{22} - h_{21})}{h_5 - h_4}; \\
G_{10} &= G_1 - G_{11}; \\
G_{28} &= \frac{G_1 \cdot (h_8 - h_9)}{h_{29} - h_{28}}; \\
W_{14} &= G_{12} \cdot (h_{12\text{д}} - h_{13}).
\end{aligned}$$

## 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.

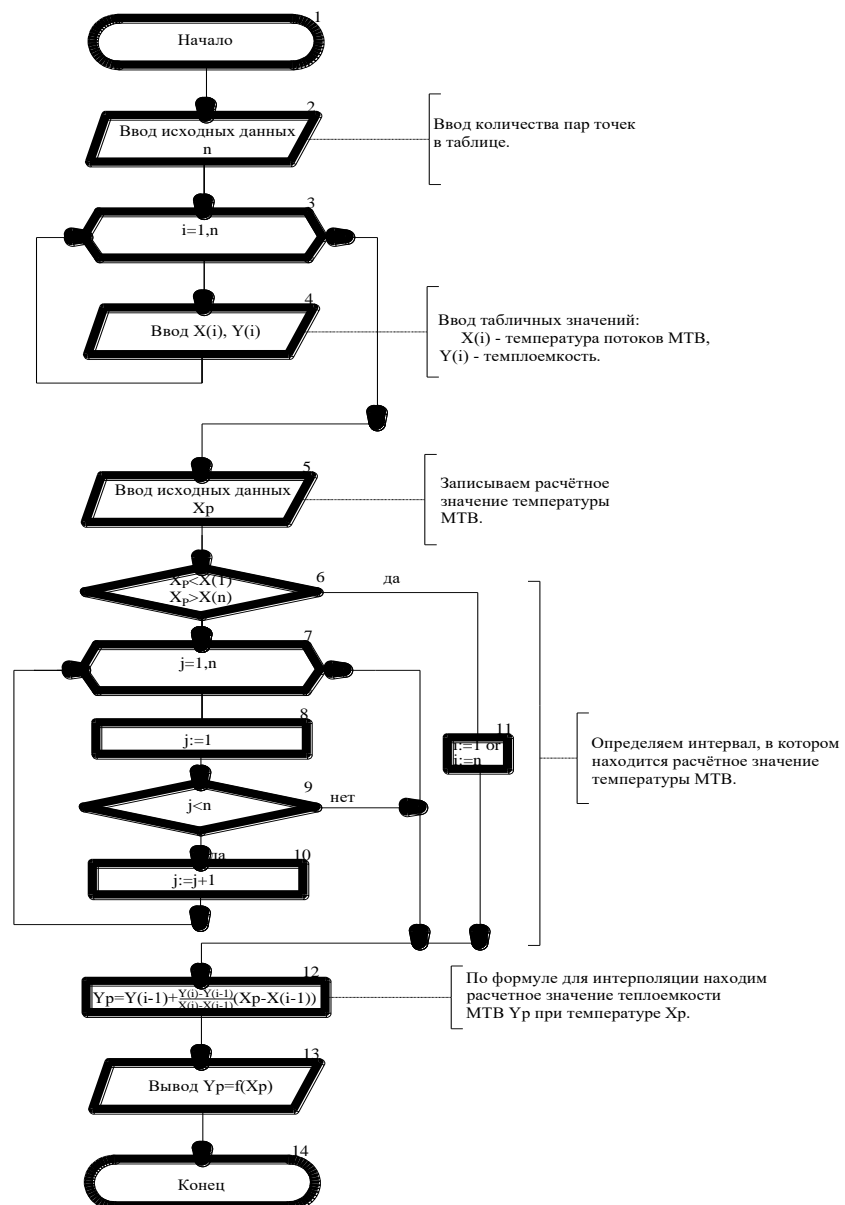


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма реализации математической модели и параметрической оптимизации

## 4.2 Результаты расчета

Был проведен расчет на базе интегрального метода.

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

$G_1$ $G_{12}$ $G_{15}$ $G_{20}$ $G_{23}$ $G_{28}$ $G_{33}$	$h_{12д}$	$W_{14}$ $W_{26}$ $L_{31}$ $W_{32}$
---	-----------	--

Таблица 4.1 – Результаты расчета

Обозначение величины	Единицы измерения	Численное значение
$G_1$	кг/с	10,74
$G_{12}$	кг/с	100,39
$G_{15}$	кг/с	101,39
$G_{20}$	кг/с	43,80
$G_{23}$	кг/с	220,67
$G_{28}$	кг/с	79,61
$h_{12д}$	кДж/кг	722,35
$h_{17д}$	кДж/кг	1159,27
$W_{26}$	МВт	77,15
$W_{14}$	МВт	70,46
$L_{31}$	МВт	78,69
$W_{32}$	кВт	18,72



## 5 ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

Численное исследование производится путем определения зависимости расхода МТВ от процентного содержания водорода в МТВ. Данная зависимость предоставлена на рисунке 5.1. Из анализа графика, можно сделать вывод о том, что с увеличением процентного содержания водорода в МТВ, расход МТВ в системы уменьшается линейно. Данная зависимость логична и объясняется тем, что при определенном количестве водорода, с увеличением его содержания в смеси, количество противоположного компонента уменьшается.

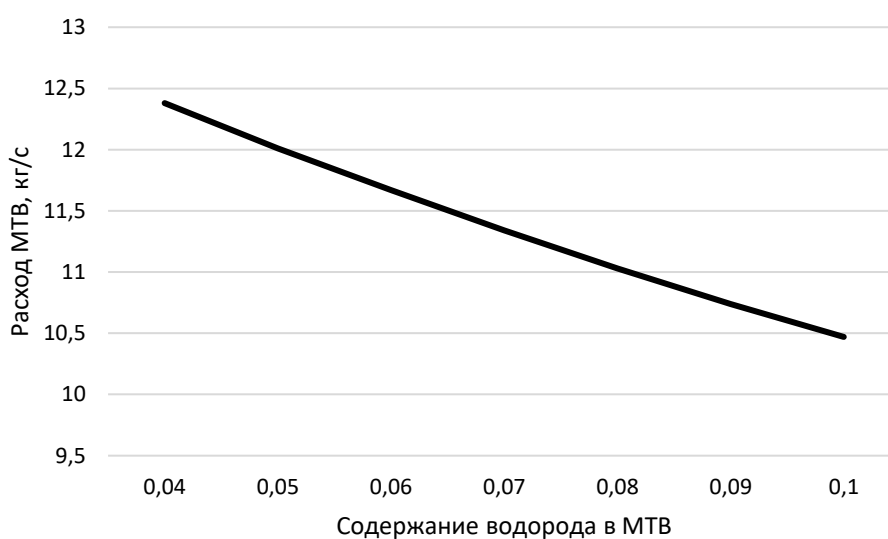


Рисунок 5.1 – Зависимость расхода МТВ от содержания водорода

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью курсового проекта являлась разработка математической модели и программного комплекса для анализа и параметрической оптимизации теплотехнической системы. Объектом исследования являлась технологическая схема гидрирования и дегидрирования на базе МЦГТ.

На основе расчетной технологической схемы была разработана математическая модель энерготехнологической системы в составе системы из 14 балансовых уравнений. Расчетная технологическая схема включает в себя 15 элементов и 34 связей. Разработан алгоритм реализации математической модели на базе интегрального метода расчета.

Проведено численное исследование энерготехнологической установки. Расчёт всех параметров был произведён в программе MS Excel.

Водород в виде жидкого метилциклогексана (МЦГ), который получают из толуола и водорода, можно безопасно и экономично хранить и транспортировать. И толуол, и МЦГ поддерживаются в жидком состоянии при температуре и давлении окружающей среды. МЦГ обычно используется в качестве растворителя, например, в ленте для коррекции белизны, и имеет низкую степень риска как химическое вещество. Используя метод ОХГ с МЦГ, водород в жидкости можно хранить и транспортировать в сжатом объеме примерно в 500 раз меньше объема водорода при температуре и давлении окружающей среды.

Водород подается потребителям после того, как он каталитически извлекается из МЦГ посредством процесса дегидрирования. Толуол, побочный продукт процесса выделения водорода, повторно используется в качестве сырья для производства МЦГ.

Использование МТЦ для транспортировки и хранения водорода является перспективным способом решения текущих проблем, связанных с использованием водорода. Созданная инфраструктура транспорта и хранения может быть пригодна для МТВ. Данный фактор является одним из самых существенных при выборе альтернативных видов топлива.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abdul Hannan Zahid, Naila Amin, Fahid Nisar, Summaira Saghir. Analysis of MTH-System (Methylcyclohexane-Toluene-Hydrogen-System) for hydrogen production as fuel for power plants, PR China: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
2. Muhammad H. Hamayun, Ibrahim M. Maafa, Murid Hussain, Rabya Aslam. Simulation Study to Investigate the Effects of Operational Conditions on Methylcyclohexane Dehydrogenation for Hydrogen Production Published, Pakistan: Department of Chemical Engineering; 2020.
3. Хрусталеv, Б.М. Техническая термодинамика. В 2 частях. Часть 2 / Б.М. Хрусталеv, А.П. Несенчук, В.Н. Романюк. – Минск: БНТУ, 2004. – 560 с.
4. 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.
5. Румянцев В.Д., Ольшанский В.М. Теплотехника: Учебное пособие / Под ред. В.И.Губинского. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 325 с.
6. Теплофизические свойства дымовых газов – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svojstva-gazov/gazovye-smesi/teploprovodnost-dymovyh-gazov-teplofizicheskie-svojstva-produktov-sgora-niyatopliva> – Дата доступа: 07.11.2020.
7. Попырин, П.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / П.С. Попырин. – М.: Энергия, 1978, – 342 с.
8. Седнин, В.А. Моделирование, оптимизация и управление теплотехническими системами: Учеб. метод. пособие по курсовому проектированию для студ. энергет. спец. / В.А. Седнин. – Мн.: БНТУ, 2002, – 75 с.