

Содержание

Введение	8
Перечень сокращений	10
▼ 1	
Постановка задачи	11
1.1 Исходные данные.....	11
1.2 Основные положения модели	13
▼ 2	
Модель проточной части	15
2.1 Создание файла проекта проточной части	16
2.2 Набор гидравлической части схемы.....	17
2.3 Процесс расширения пара.....	26
2.4 Дополнение схемы ротором, ступенями и электрогенератором	34
2.5 Создание файлов с характеристиками ступеней.....	37
2.5.1 Задание таблицы коэффициента сопротивления KSI для 1-й ступени	39
2.5.2 Задание таблицы КПД для 1-й ступени.....	42
2.5.3 Задание таблицы мощности и нормировка для 1-й ступени	43
2.5.4 Задание таблицы коэффициента сопротивления KSI для 2-й ступени.....	43
2.5.5 Задание таблицы КПД для 2-й ступени.....	44
2.5.6 Задание таблицы KSI для 3-й ступени.....	44
2.5.7 Задание таблицы КПД для 3-й ступени.....	45
2.5.8 Задание таблицы KSI для 4-й ступени.....	46
2.5.9 Задание таблицы КПД для 4-й ступени.....	47
2.6 Настройка свойств блоков на номинальные параметры	48
2.6.1 Характеристики ступеней турбины.....	48

2.6.2	Свойства каналов для проточной части.....	49
2.6.3	Отладочные параметры на схеме	55
2.6.4	Номинальные параметры пара.....	57
2.6.5	Начальные параметры теплоносителя в схеме	59
2.6.6	Исправление начальной температуры в схеме	65
2.6.7	О задании начальной температуры или энтальпии в контрольных объемах.....	68
2.7	Корректировка характеристик ступеней турбины	69
2.7.1	Четвертая ступень	70
2.7.2	Третья ступень.....	71
2.7.3	Вторая ступень	71
2.7.4	Первая ступень	72
2.8	Ротор и турбогенератор.....	72
2.9	Оценка полученных результатов, визуализация.....	74
2.9.1	Вывод давлений и погрешностей их вычисления	74
2.9.2	Вывод расходов и погрешностей их вычисления	78

▼ 3

Модель главного конденсатора 81

3.1	Понятие о субмодели и типовой подпрограмме	83
3.2	Создание теплогидравлической подпрограммы.....	83
3.2.1	Набор схемы внутри субмодели.....	85
3.2.2	Создание свойств субмодели	88
3.2.3	Задание имен блоков внутри субмодели	91
3.2.4	Скрипт субмодели конденсатора	91
3.2.5	Параметры конденсатора	93
3.2.6	Окончательное задание всех свойств.....	96
3.2.7	Подключение каналов к модели конденсатора	97
3.3	Отладка номинальных параметров конденсатора.....	100
3.3.1	Добавление вывода параметров на расчетную схему.....	100
3.3.2	Анализ переходного процесса	102
3.3.3	Стационарное состояние модели конденсатора	106
3.4	Объединение конденсатора и модели проточной части	108

▼ 4

Модель ПНД-1 110

4.1	Исходные данные.....	110
4.2	Создание подпрограммы	112
4.3	Параметризация и настройка номинального состояния.....	114
4.3.1	Свойства и параметры модели подогревателя	114
4.3.2	Задание свойств блоков на основе свойств субмодели.....	116

4.3.3 Параметры подогревателя	119
4.3.4 Добавление каналов по пару и питательной воде.....	119
4.3.5 Отладка номинального состояния.....	124
4.4 Подключение модели ПНД-1 к проточной части	126

▼ 5

Моделирование ПВД-2 и ПВД-3 с использованием подпрограммы ПНД.....128

5.1 Исходные данные.....	128
5.2 Создание подпрограммы	128
5.3 Задание верных свойств.....	129
5.4 Настройка номинального состояния.....	130
5.5 Объединение проточной части с моделями ПВД-2 и ПВД-3	132
5.5.1 Греющий пар	132
5.5.2 Питательная вода.....	134

▼ 6

О подогревателях воды промежуточного контура.....136

6.1 Исходные данные.....	136
6.2 Недостающие элементы модели.....	136

▼ 7

Модель блока конденсатных электронасосов.....138

7.1 Характеристика насоса ЭКН-150-110.....	138
7.2 Создание схемы группы ЭКН.....	141
7.2.1 Необходимые блоки	142
7.2.2 Свойства блоков	143
7.3 Отладка схемы.....	146
7.4 Объединение ЭКН с конденсатором	147
7.5 Объединение с ПНД-1	148

▼ 8

Модель питательных электронасосов.....152

8.1 Характеристика насоса ЭПН-150-75	152
8.2 Создание схемы группы ЭПН	153
8.3 Свойства блоков и номинальное состояние	154

▼ 9

Модель деаэратора 157

9.1 Отличие деаэратора от ПНД и ПВД..... 157

9.2 Набор схемы 158

9.3 Предварительная отладка на номинальные параметры..... 160

▼ 10

Объединение подсистем 163

10.1 Характеристика сливного насоса ЭКН-12-50, добавление его в схему 163

10.2 Подключение ПНД-1 к ДА по конденсату греющего пара 164

10.3 Подключение ПНД-1 к ДА по линии главного конденсата 167

10.4 Подключение ПВД-3 и ПВД-2 к ДА 170

10.5 Подключение питательных насосов 173

▼ 11

Оценка получившегося стационарного состояния 175

11.1 Донастройка отдельных частей модели 175

11.2 Оценка полученного результата, направления дальнейшей работы..... 178

▼ 12

Регуляторы уровней 180

12.1 Подход SimInTech к созданию комплексных моделей 180

12.1.1 База сигналов, ее разработка 181

12.1.2 Датчики, добавление в базу и в модель..... 184

12.1.3 Типовая подпрограмма 187

12.1.4 Модификация типовой подпрограммы датчика 190

12.2 Перечень и описание основных регуляторов ПТУ 193

12.2.1 Регулятор расхода питательной воды 194

12.2.2 Регулятор давления пара в концевых уплотнениях турбины..... 194

12.2.3 Регулятор давления пара на деаэратор 194

12.2.4 Регулятор давления пара перед опреснительной установкой, регулятор давления пара от вспомогательного котлоагрегата на хозяйственные и бытовые нужды 195

12.2.5 Регулятор уровня в деаэраторе 195

12.2.6 Регулятор уровня конденсата в ПНД-1 195

12.2.7 Регулятор уровня конденсата в ПВД-2 195

12.2.8 Регулятор уровня конденсата в ПВД-3 196

12.2.9 Регулятор уровня конденсата в конденсаторе.....	196
12.2.10 Регуляторы уровня конденсата в основных подогревателях промежуточного контура и в пиковом подогревателе	196
12.2.11 Регулятор уровня в цистерне сбора конденсата	196
12.2.12 Регулятор температуры воды промежуточного контура на выходе из основных подогревателей промежуточного контура	196
12.2.13 Регулятор температуры воды промежуточного контура на выходе из подогревателя пикового.....	196
12.2.14 Температура конденсата перед конденсатными насосами ПГНД	196
12.2.15 Частота вращения ротора и электрическая мощность ТГ	197
12.2.16 Давление свежего пара ПТУ (основной и резервный регуляторы)	197
12.2.17 Давление пара в отборе ТА	197
12.2.18 Другие (локальные) регуляторы.....	197
12.3 Типовые блоки управления оборудованием.....	201
12.3.1 Блок управления клапаном.....	201
12.3.2 Упрощенный «быстрый» способ реализации регуляторов, работающих совместно с моделью объекта, плюсы и минусы такого подхода	203
12.4 Разработка РУГК – регулятора уровня в главном конденсаторе	210
12.4.1 Пошаговое описание действий для создания первого регулятора....	210
12.4.2 Тестирование работы регулятора	214
12.5 РУК-1 – основной регулятор уровня в подогревателе № 1 ПНД-1	220
12.5.1 Пошаговое описание модификаций первого регулятора, как из его копии сделать другой регулятор	220
12.5.2 Краткое описание РУК-2 – дополнительного регулятора уровня конденсата в ПНД-1	220
12.5.3 Тестирование работы регулятора РУК-1	221
12.6 РУК-3 – регулятор уровня конденсата в подогревателе № 2 ПВД-2.....	225
12.6.1 Реализация и тестирование работы РУК-3.....	225
12.7 РУК-4 – регулятор уровня конденсата в подогревателе № 3 ПВД-3.....	228
12.7.1 Реализация и тестирование работы РУК-4.....	229
12.8 РУД-1 – регулятор уровня в деаэраторе атмосферном	230
12.9 Оценка полученной комплексной модели.....	234
12.9.1 О реализованных регуляторах	236
Заключение.....	240
Список литературы	241

Введение



В данной методике приведено пошаговое описание процесса создания модели турбины на базе теплогидравлического кода HS, являющегося одним из модулей среды динамического моделирования SimInTech.

Идеология «теплогидравлического кода», сложившаяся в атомной отрасли и некоторых других отраслях техники, на многих предприятиях позволяет разделить задачу построения модели сложного теплотехнического объекта на две части, примерно равные по сложности, а именно: а) разработка типовых «блоков» и типовых математических моделей, стоящих за каждым из блоков, а также метода их совместного решения; б) разработка собственно самой модели того или иного объекта.

Если первую задачу решает разработчик теплогидравлического кода и его блоков и делает это по возможности универсальным способом, теоретическим и не зависящим или слабо зависящим от конкретной модели объекта, то вторую задачу решает пользователь (пользователи) кода, применяя стандартные подпрограммы и блоки для своих, уже конкретизированных нужд, настраивая их под особенности конкретного объекта. При этом вторая задача решается уже без непосредственного написания уравнений динамики типовых элементов (трубопровод, узел смещения, насос, регулирующий клапан, граничное условие и т. д.), а пользователь кода использует проработанные ранее элементы как готовые «черные ящики» с описанными входными свойствами и выходными параметрами (результатами расчета кода). Это дает возможность многократного повторного использования стандартных подпрограмм и облегчает пользователям кода их задачи, но не снимает требований к квалификации пользователей – для корректного создания модели от пользователя требуется понимание как архитектуры самого кода, принципов, на которых построена схема решения, так и понимание моделей, принятых допущений и ограничений, заложенных в код и в конкретные математические модели того или иного оборудования либо элемента схемы.

Расчетная теплогидравлическая схема HS в SimInTech строится в схемном окне на своем расчетном слое (шаблоне проекта), в котором допустима простановка только тех блоков, которые может обработать модуль HS. Построение такой схемы ведется по определенным правилам, часть из которых будет поясняться по мере набора схемы. Но, вообще говоря, данное руководство ориентировано на пользователей SimInTech, уже прошедших другие базовые

обучающие курсы и знакомых в той или иной степени с интерфейсами SimInTech (например, со скриптами, сигналами, блоками и т. п.).

Методика основана на версии SimInTech 2.21.3.17. По мере разработки кода HS результаты, полученные в следующих версиях, могут в какой-то части отличаться от результатов, приведенных в данной методике.

После создания модели ПТУ в методике приведено пошаговое описание разработки модели датчика, исполнительного механизма и регуляторов для комплексной модели на примере регуляторов уровня в подогревателях, в деаэраторе и в главном конденсаторе. Эта часть АСУ ТП создается в SimInTech на базе схемы общего вида (схемы автоматики) из общетехнической библиотеки блоков и средствами базы данных сигналов SDB, входящей в состав SimInTech, которая позволяет осуществлять синхронный расчет модели объекта и модели алгоритмов и регуляторов.

Выполнена настройка регуляторов, и описаны подходы к анализу работы и динамического поведения расчетной модели. Приведены некоторые примеры регуляторов и алгоритмов из более сложных проектов.

В итоге получается комплексная математическая модель, в которой решается задача совместного расчета модели объекта, его точек контроля (датчиков), алгоритмической части АСУ ТП и моделей исполнительных устройств (электродвигателей), осуществляющих воздействие на объект управления.

Перечень сокращений

АСУ	–	автоматизированная система управления
АСУ ТП	–	автоматизированная система управления технологическими процессами
АУ	–	автоматическое управление
БД	–	база данных (сигналов)
БУК	–	блок управления клапаном
ВКУ	–	вспомогательная конденсационная установка
ГК	–	главный конденсатор
ДА	–	деаэратор атмосферный
Ду	–	условный диаметр трубопровода
ДУ	–	дистанционное управление
ДУУ	–	дрессельно-увлажнительное устройство
КГП	–	конденсат греющего пара
КПД	–	коэффициент полезного действия
МВт эл.	–	мегаватт электрической мощности
ПВД	–	подогреватель высокого давления
ПИ	–	пропорционально-интегральный (регулятор)
ПИД	–	пропорционально-интегрально-дифференцирующий (регулятор)
ПК	–	питательный клапан
ПНД	–	подогреватель низкого давления
ПЭБ	–	плавучий энергоблок
ПТУ	–	паротурбинная установка
РК	–	регулирующий клапан
РПН	–	разводочный питательный насос
РУ	–	реакторная установка
СУ	–	система управления
ПГНД	–	парогенератор низкого давления
ТА	–	турбоагрегат
ТГ	–	турбогенератор
ЧВД	–	часть высокого давления
ЧНД	–	часть низкого давления
ЭКН	–	главный конденсатный электронасос
ЭКНС	–	конденсатный электронасос сливной
ЭПН	–	главный питательный электронасос
НС	–	от англ. Hydro Solver, наименование теплогидравлического расчетного модуля (кода) среды SimInTech

Постановка задачи

1

Модель турбины для своего создания требует определенных исходных данных. Как минимум это принципиальная тепловая схема турбины, основные параметры (давление, температура или энтальпия) рабочей среды в одном из номинальных режимов работы ПТУ, расход свежего пара на турбину, параметры пара в отборах, давление в конденсаторе. Расход и температура воды, охлаждающей конденсатор. Расходы пара из отборов, номинальные параметры работы ПНД и ПВД, характеристики насосов, диаметры трубопроводов и высотные отметки того или иного оборудования/трубопровода.

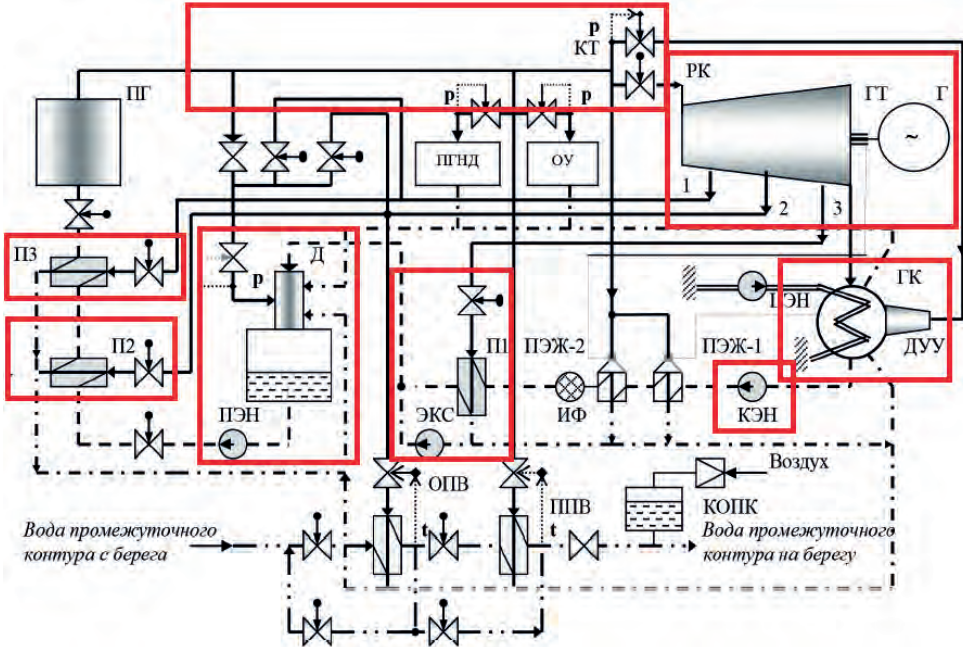
На основе этих и других исходных данных возможна разработка модели ПТУ.

1.1 Исходные данные

В качестве исходных данных при создании этой модели использовались статья [1], отчет [2], тепловая принципиальная схема паротурбинной установки [3].

Пределы и объем моделирования: от входа свежего пара на турбину до выхода питательной воды из подогревателя высокого давления. Из оборудования смоделировано: проточная часть турбины, включая ступени и отборы пара, модель ротора и электрогенератора; конденсатор КП-3200; группа конденсатных насосов; ПНД-1 (ПН-100); деаэратор атмосферный; конденсатный сливной электронасос; группа питательных насосов; ПВД-2,3 (ПВ-280-1 и ПВ-280). Основные части модели обведены красными прямоугольниками на рис. 1.1.1 (рисунок взят из [1]). Парогенераторы, эжекторы, сетевые подогреватели ПС-450 и ПС-450П не входят в объем моделирования, представленный в методике, однако могут быть относительно несложно читателем добавлены к модели для более полного моделирования других режимов. Арматура и точки контроля не входят в объем моделирования, кроме самых необходимых регулирующих клапанов, позволяющих при ручном управлении ими настроить номинальное состояние.

Следует также учесть, что рассматриваемая модель – учебная, и некоторые важные моменты здесь описаны чрезмерно подробно, а некоторые (либо не очень важные, либо следующего уровня сложности), наоборот, опущены. Переходные режимы не рассматриваются, кроме некоторых переходных режимов около номинального состояния при его настройке.



Принципиальная схема пароконденсатного цикла ПЭБ:

ПГ – парогенератор; ГТ – главная турбина; Г – генератор; ГК – главный конденсатор;
 ДУУ – дроссельно-увлажнительное устройство; КЭН – конденсатный электронасос;
 ПЭЖ-1, ПЭЖ-2 – пароструйные эжекторы; ЦЭН – циркуляционный электронасос;
 ЭКС – электронасос конденсатный сливной; ПЭН – питательный электронасос;
 П1, П2, П3 – подогреватели конденсата и питательной воды;
 Д – деаэратор; ОПВ – основные подогреватели воды промежуточного контура;
 ППВ – пиковый подогреватель воды промежуточного контура;
 КОПК – компенсатор объема промежуточного контура; ПГНД – парогенератор низкого
 давления; ОУ – опреснительная установка; РК – регулирующий клапан; КТ – клапан травления

Рисунок 1.1.1 Основные части модели ПТУ

Параметры и исходные данные по оборудованию установки приведены по мере разработки модели. Приведем здесь, в табл. 1.1.1 только основные параметры для одного из режимов работы ПТУ, на которые будет настраиваться модель.

Таблица 1.1.1 Основные параметры моделируемого режима работы ПТУ

Наименование параметра	Значение
Электрическая мощность генератора при КПД генератора 98 %	35.0 МВт
Номинальная частота вращения ротора	50 об/с (3000 об/мин)
Абсолютное давление свежего пара перед ПТУ	35 кгс/см ²
Температура свежего пара перед ПТУ	285 °С
Расход свежего пара на турбину	220 т/ч

Окончание табл. 1.1.1

Наименование параметра	Значение
Абсолютное давление пара в I отборе	9.2 кгс/см ²
Абсолютное давление пара во II отборе	3.64 кгс/см ²
Абсолютное давление пара в III отборе	0.96 кгс/см ²
Абсолютное давление пара в конденсаторе	0.051 кгс/см ²
Расход пара из I отбора (греющий пар на ПВД-3)	18.4 т/ч
Расход пара из регулируемого теплофикационного II отбора (греющий пар на ПВД-2, на ДА, плюс расход на другие нужды)	66.6 т/ч (13 + 5 + 48.6) т/ч
Расход пара из III отбора (греющий пар на ПНД-1)	10 т/ч

1.2 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ

В коде HS модель теплоносителя является однокомпонентной и односкоростной, что означает расчет параметров теплоносителя в каждом контрольном объеме с одним давлением и одной температурой (энтальпией), а расход теплоносителя между контрольными объемами вычисляется как одна переменная – расход пароводяной смеси, не выделяя отдельно паровую и жидкую фазы. Это накладывает определенные ограничения на моделируемые процессы – мы не можем смоделировать неконденсирующиеся газы в трактах течения рабочего тела, в конденсаторе, в деаэраторе и подогревателях, не можем смоделировать эффект «проскальзывания» одной фазы относительно другой. Не моделируются какие-либо неравновесные процессы с одновременным наличием в одном контрольном объеме перегретого пара и/или недогретой воды. Единственный элемент, где реализована двухтемпературная модель в коде HS, – это пароводяной компенсатор объема.

Можно считать, что модель турбины на базе кода HS является в этом смысле «идеальной» – никаких подсосов воздуха не моделируется, рассматривается только течение чистого водяного теплоносителя (вода, водяной пар или их смесь).

Для сокращения объема материала теплотери к окружающей среде не рассматриваются подробно – считаем их пренебрежимо малыми. Хотя, вообще говоря, их надо учитывать и моделировать, и код HS позволяет это сделать.

Начнем создавать модель ПТУ по частям, отлаживая сначала по отдельности составные части будущей модели. Практика создания сложных теплогидравлических моделей динамики заключается в следующем: набирается относительно небольшая часть модели, задаются начальные значения параметров и свойства объектов, запускается на расчет, разработчик убеждается в том, что схема устойчива, рассчитываемые параметры адекватны моделируемой установке и в той или иной степени близки к требуемым номинальным параметрам. При сильных отклонениях или неустойчивости вносятся корректировки в задаваемые параметры расчетной схемы, в начальные условия и/или в топологию, итерация «тестовый расчет – оценка» повторяется, затем еще и еще раз, до достижения приемлемого результата. Таким образом, в несколько итераций разработчик добивается того, что моделируемая часть большой модели по своим параметрам (на которые схема выходит «сама» через 10...60...600 секунд рас-

чета) близка к номинальным, и на этом отдельная, автономная отладка этой части завершается, происходит переход к следующей части. Набрал таким образом несколько автономно отлаженных частей, разработчик далее соединяет их в одну большую модель (так же итерациями). За счет того, что по отдельности части уже были отлажены на согласованные друг с другом номинальные параметры, при интеграционном процессе происходит минимум корректировок.

Если делать сразу одну большую модель без промежуточных тестовых моделирований и оценки полученных результатов, есть близкий к 100 % риск получить большую неработоспособную модель, в которой почти невозможно найти причину неустойчивости (как правило, не одну), и скорректировать такую модель, чтобы она начала считать верно, не будет представляться возможным.

Модель проточной части

2

Проточная часть состоит из последовательности внутренних узлов и каналов кода HS, входом в которые будет являться граничное условие типа «расход» (блок типа **HS – Подпитка**), а выходом из модели будет являться граничное условие типа «давление» (блок типа **HS – Граничный узел**), моделирующий конденсатор. Также будет смоделирован каждый из трех отборов своим каналом-ответвлением и своим блоком типа **HS – Подпитка**, с заданным отрицательным расходом, соответствующим номинальному расходу пара в каждом отборе.

Такая нодализация схема позволяет:

- 1) «держать» на заданном уровне расход теплоносителя через соответствующие ступени ПТУ и расходы пара из каждого отбора;
- 2) «держать» заданным и постоянным давление на выхлопе из ПТУ (каким оно и должно быть в конденсаторе при стационарной работе турбины);
- 3) при заданных расходах и давлении на выходе отладить характеристики ступеней турбины, подобрать их таким образом, чтобы при номинальном расходе и параметрах пара на входе в ПТУ давление и температура (энтальпия) пара в отборах были близки к номинальным, а получаемая в модели генератора электрическая мощность соответствовала паспортным данным ПТУ.

Другими словами, тестовые запуски на расчет такой модели (как бы зажатой между граничными условиями типа «давление» с одной стороны и «расход» с других сторон) позволяют привести в соответствие с номинальными параметрами внутреннее содержимое проточной части. И, отладив ее один раз, мы в дальнейшем будем уверены, что при номинальных параметрах свежего пара и номинальном давлении в конденсаторе, а также при номинальных расходах в отборах пара проточная часть «выдаст» нам номинальные распределения давлений и температур по отборам и номинальную мощность на электрогенератор.

2.1 СОЗДАНИЕ ФАЙЛА ПРОЕКТА ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ

Будем создавать модель турбины в директории «**turbine**» на диске **C:** (можно создавать в любом другом месте, в методике будем исходить из указанного расположения). Автономные модели частей ПТУ будем набирать сначала каждую в своей директории. Создайте директорию «**C:\turbine\Проточная часть**», затем создайте новый проект HS в среде SimInTech и сохраните этот новый проект в файл **C:\turbine\Проточная часть\TK-35-38.prt**.

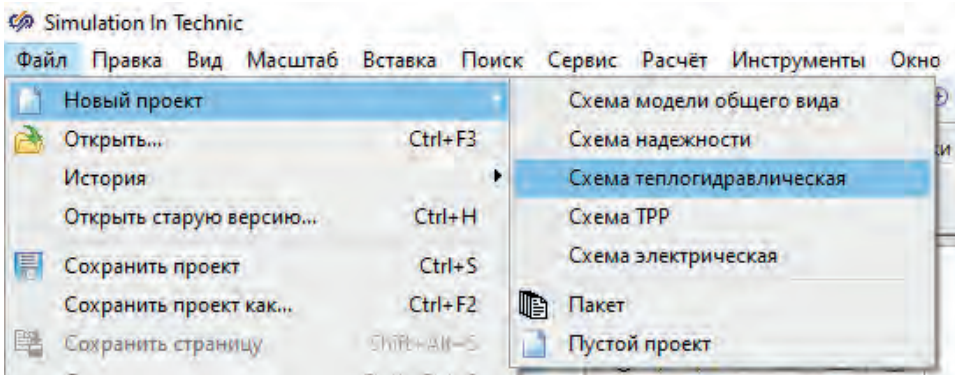


Рисунок 2.1.1

Для этого выполните следующие действия:

- запустите SimInTech, выберите пункт главного меню **Файл – Новый проект – Схема теплогидравлическая** (рис. 2.1.1). Откроется новый проект с расчетным слоем HS;
- выберите пункт главного меню **Файл – Сохранить проект как...** и в появившемся диалоговом окне выберите расположение «**C:\turbine\Проточная часть**», впишите имя файла **TK-35-38.prt** (рис. 2.1.2);
- проект сохранится, а в заголовке окна появится новое имя проекта.

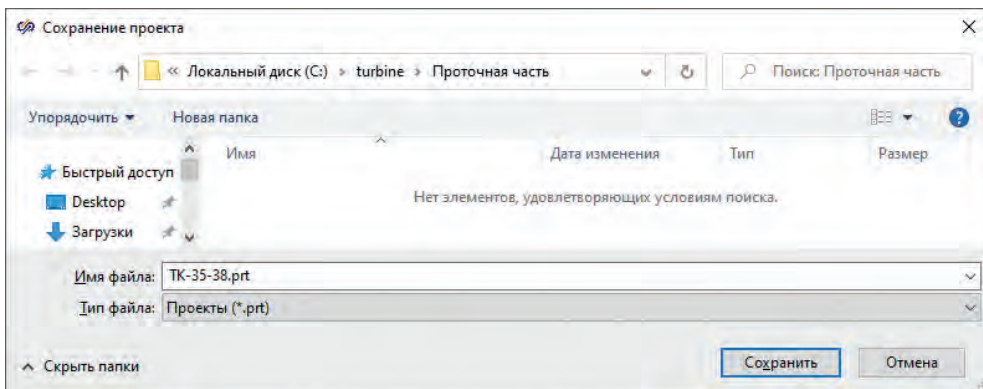


Рисунок 2.1.2

2.2 НАБОР ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СХЕМЫ

При активном проекте с расчетным слоем HS палитра блоков в SimInTech претерпевает изменения, и остаются доступными только блоки, допустимые к размещению на теплогидравлической схеме кода HS.

Разместите на новой схеме блоки:

- 9 блоков типа **HS – Внутренний узел** (три из них – для моделирования ответвлений из отборов);
- 9 блоков типа **HS – Канал**;
- 1 блок типа **HS – Граничный узел**;
- 4 блока типа **HS – Подпитка**.

Каналы лучше размещать, не соединяя пока их с узлами, отдельно. Это позволит более тщательно соединить их с узлами, при этом не возникнет «проблемных» мест (иногда бывает не видно, что узел с каналом рассоединен). Хотя есть возможность, размещая каналы, сразу их соединять с узлами. После размещения всех блоков у вас должна получиться картинка, аналогичная рис. 2.2.1.

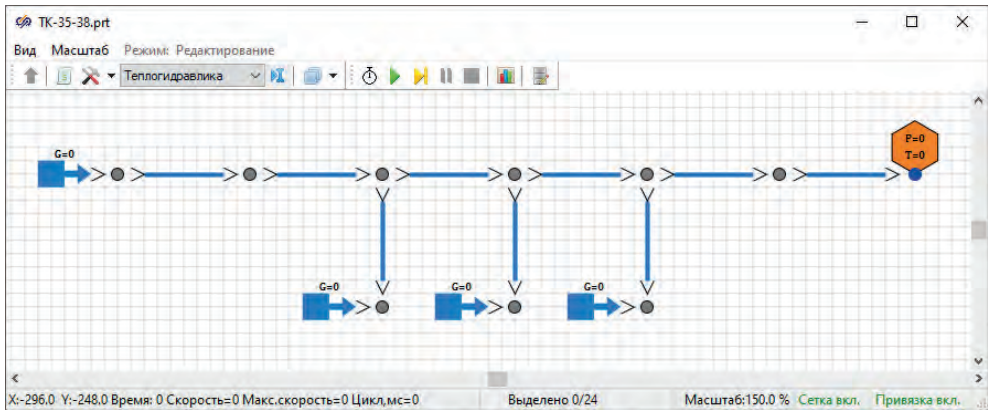


Рисунок 2.2.1

Все размещаемые блоки находятся в библиотеке блоков на вкладке **Теплогидравлика**, в первых двух выпадающих пунктах (см. рис. 2.2.2 и 2.2.3).

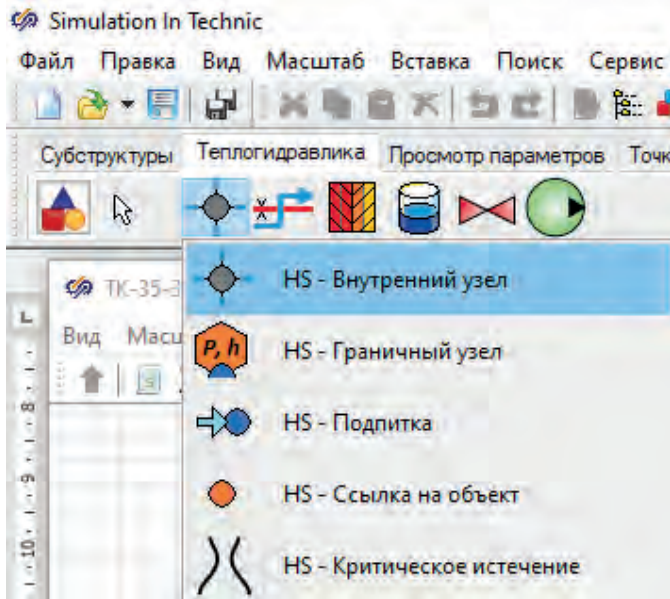


Рисунок 2.2.2

При простановке на схему этих блоков в них остаются заданными свойства по умолчанию, которые хранятся в библиотеке блоков. Имена блоков автоматически инкрементируются на 1. Сделайте так, чтобы внутренние узлы слева направо именовались $Node_1, Node_2, Node_3, Node_4$ и т. д. до $Node_7, 8, 9$ для трех узлов под каналами – отводами для отборов. Имена нам потребуются в дальнейшем для привязки к ним графиков и вывода отладочной информации. Для каналов аналогично – вдоль проточной части пусть будут каналы $Channel_1, Channel_2$ и т. д. до $Channel_9$ для 3-го отбора.

При наборе схемы, по сути, есть всего две задачи – задать верную топологию (нодализацию) расчетной схемы, задать верно свойства блоков (начальные и геометрические параметры, граничные условия). Причем обе задачи являются крайне важными, а свойства следует осознанно и на основе исходных данных задавать практически у каждого размещенного блока. Некоторые свойства можно будет оставить заданными по умолчанию – однако это скорее исключение, чем правило. От правильности задания свойств зависит конечный ответ и поведение модели при расчетах. При этом на практике часто происходит «противостояние» между разработчиком кода и пользователями. Последние говорят, что код считает неверно, а разработчик говорит, что начальные и геометрические параметры пользователи задали неправильно, отсюда и неверный результат. Истина, как обычно, находится посередине, но при создании какой-то новой модели приходится как пользователям кода подстраиваться под особенности реализации моделей блоков, так и разработчику кода – иногда что-то менять или улучшать в моделях. Чаще всего, конечно, неправ пользователь, потому что код и его блоки были проверены на N предыдущих моделях, а пользователь делает каждый раз уникальную новую модель. Но бывает, что находятся ошибки и в коде.

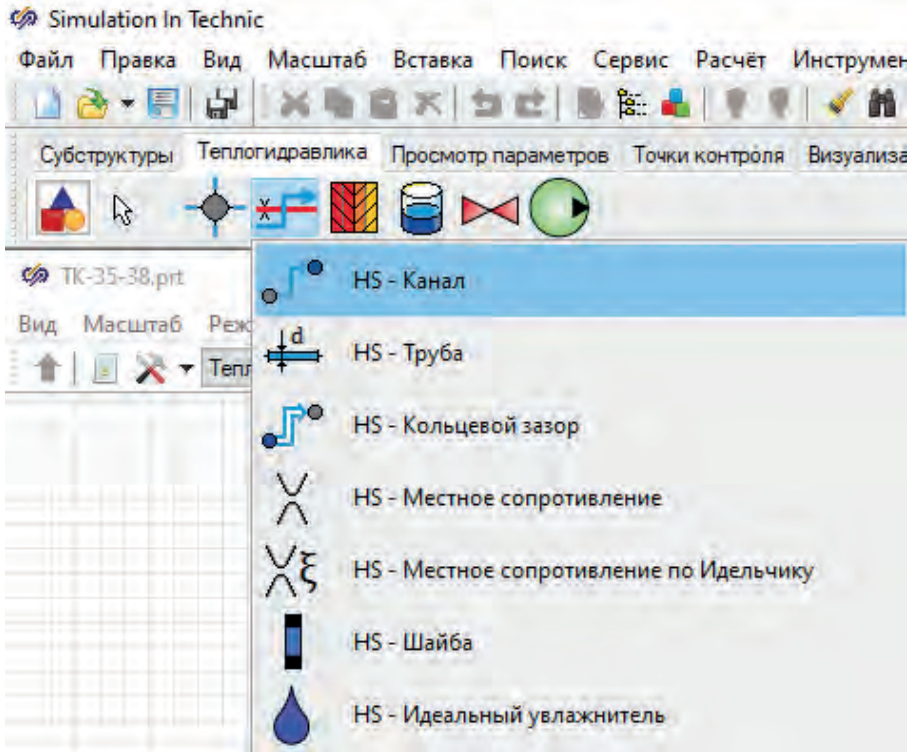


Рисунок 2.2.3

Приведем простой пример, когда неправ пользователь. Допустим, у нас в каком-то блоке корректным образом реализована модель II закона Ньютона, и ускорение рассчитывается в зависимости от суммы приложенных сил и массы объекта $a(t) = F(t)/m$. Неопытный пользователь или по незнанию, или просто по невнимательности ставит блок на схему и задает в свойствах блока отрицательную массу -3 кг. При этом на выходе получает ускорение, направленное против приложенной силы, о чем и сообщается разработчику кода, что «у вас там ошибка». Хотя ошибка совсем не там...

В теплогидравлических задачах среда, как правило, течет из области с высоким давлением в область с низким давлением. Но это верно при одной и той же высотной отметке узлов. При расположении какого-либо узла внизу давление там будет выше на величину гидростатического напора, и может быть уже ситуация, когда направление движения среды (расход среды) происходит из узла с меньшим давлением, находящимся вверху, в узел с большим давлением, находящимся внизу. Неопытному пользователю это кажется ошибкой.

Поэтому следует относиться к заданию свойств блоков максимально аккуратно. К коду отношение должно быть таким: да, код может содержать ошибки, иногда и грубые, однако вероятность этого невелика, и в первую очередь следует перепроверить свои заданные свойства. Кроме этого, при наборе схем есть еще ряд негласных «правил» и практических приемов работы, полезных для приведения схемы в работоспособное состояние. Об этом будет позже.

Разместив все нужные блоки на схеме, следует соединить их линиями связи – каждую подпитку подключаем к своему внутреннему узлу, а каждый вход и выход канала также подключаем к своему внутреннему или граничному узлу, как показано на рис. 2.2.4.

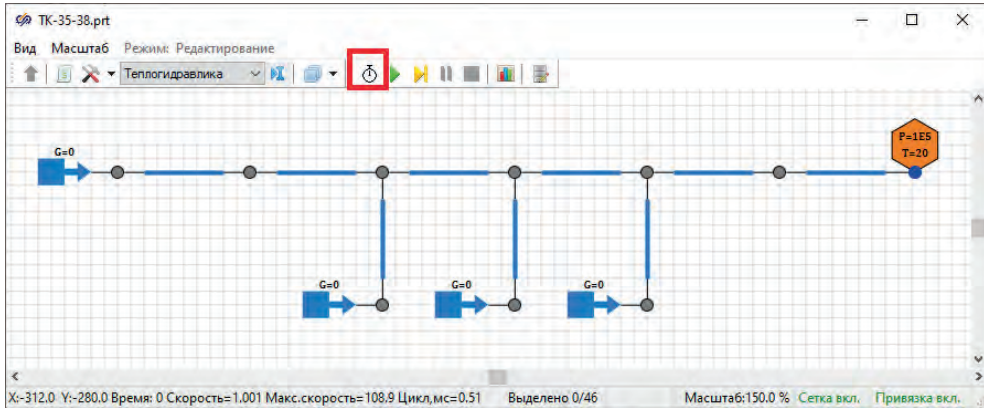


Рисунок 2.2.4 Блоки, соединенные линиями связи

Далее, для проверки корректности топологии, можно нажать на кнопку инициализации (см. рис. 2.2.4). И если вы проделали все верно, то кнопка **Стоп** (красный квадрат) станет активной, а в нижней строке схемного окна появится надпись **Старт**. Это означает, что схема набрана формально корректно и годится для запуска на расчет.

По умолчанию у размещенных блоков заданы свойства 20-градусной воды при атмосферном давлении, в каналах задан диаметр 0.01 м и длина 1 м. А у блоков, моделирующих граничные условия, выведены на расчетную схему величина расхода (у подпиток по умолчанию 0) и величина давления с температурой для граничного узла. Для отладки схемы бывает полезно в процессе расчета видеть основные параметры блоков на самой расчетной схеме. Давайте добавим такие блоки для внутренних узлов и для размещенных каналов. Нас будут интересовать давления и температуры у внутренних узлов, а также расходы по каналам. Это вкладка **Просмотр параметров**, там выбираете **В узле** и блок типа **HS – Контроль давления, температуры и энтальпии в узле**. Разместите его на каждом узле схемы. Для каналов выберите блок из той же вкладки, пункт **В канале**, и там блок типа **HS – Контроль массового расхода в канале**. Разместите этот блок на канале входном в левой части схемы, на каналах между отборами, на каналах отборов и на одном канале на выходе схемы. Блоки следует размещать, кликая на соответствующий узел или канал, чтобы блоки контроля становились дочерними к расчетным блокам. Блоки контроля сами по себе ничего не считают, они просто визуализируют расчетные параметры родительских блоков.

При инициализации такой схемы у вас должна получиться картина, похожая на рис. 2.2.5.

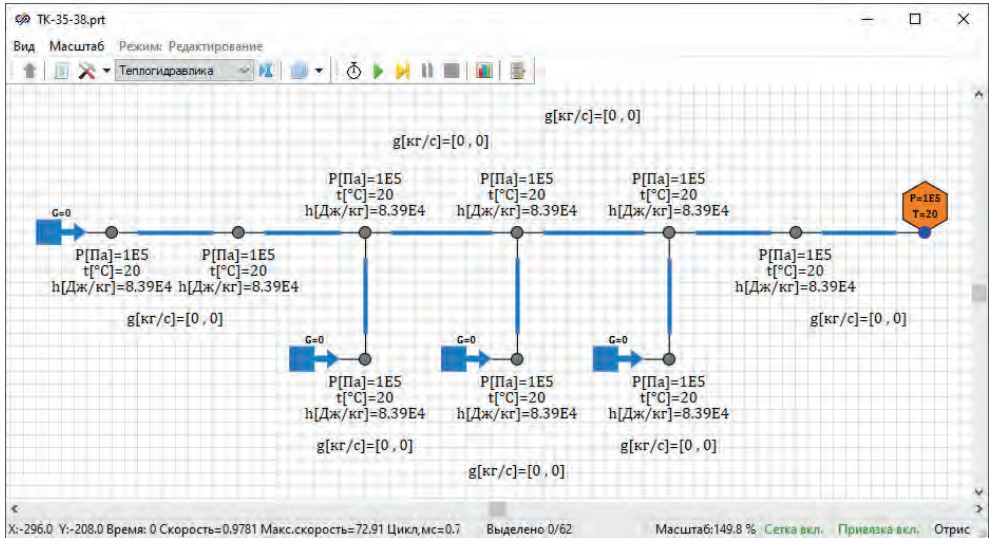


Рисунок 2.2.5

При запуске на расчет параметры схемы не должны измениться, т. к. давление в граничном условии совпадает с давлениями во всех контрольных объемах схемы, а расходы во всех подпитках нулевые. То есть модель будет пребывать в «холодном» стационарном состоянии.

Давайте зададим некоторый произвольный небольшой расход на входе и на выходах из отборов, для проверки работоспособности набранной схемы. Например, задайте в подпитках следующие значения расходов: +0.4, -0.05, -0.1 и -0.2 кг/с. Для задания свойств следует перевести схему в остановленное состояние (кнопкой **Стоп**), то есть выключить расчет или инициализированное состояние. Пример задания свойства приведен на рис. 2.2.6.

Название	Имя	Формула	Значение
Расход, кг/с	G	0.4	0.4
Температура, °C	T		20
Определяющее свойство, по которому вы...	Defi...		Температура
Максимальное противодавление, Па	Pmax		10000000
Концентрация пассивных примесей, кг/кг	C_p...		[]

Рисунок 2.2.6 Задание расхода в подпитке

Таким образом, на входных каналах должен установиться через время расход, равный $+0.4$ кг/с, на каналах отборов $+0.05$, $+0.1$ и $+0.2$ кг/с, на канале между 1-м и 2-м отборами $+0.35$ кг/с, на следующем между 2-м и 3-м отборами $+0.25$ кг/с и потом на выходе $+0.05$ кг/с. Обратите внимание, что в трех подпитках на отборах следует задать отрицательные значения расходов, что означает «унос» теплоносителя из этих узлов с заданным расходом. Но расход в каналах (во всех в данном случае) будет насчитан положительным, т. к. при размещении каналов мы их разместили по ходу течения теплоносителя, в том числе и по ходу течения теплоносителя в отборы.

Если вы все сделали верно, то результат расчета на 5-й секунде и далее будет похож на рис. 2.2.7.

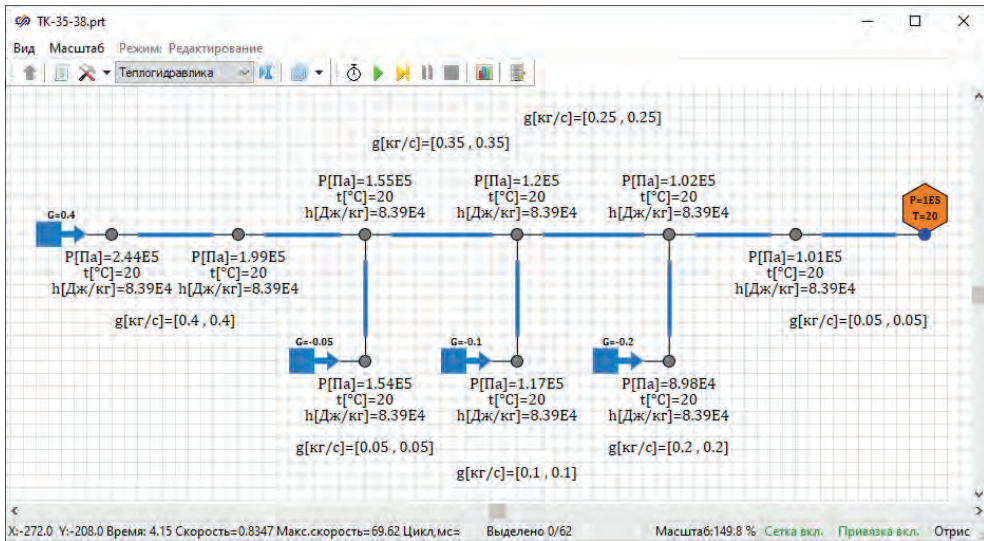


Рисунок 2.2.7 Тестовый расчет с холодной водой

В данном случае, так как мы задали расход, соразмерный с проходным сечением каналов, решение схемы «сошлось», и через несколько секунд она вышла на стационарный режим с указанными расходами. Обратите внимание, что давления во внутренних узлах стали равными уже не 1 атмосфере (100 000 Па, заданным по умолчанию), а пересчитались в новые значения, и мы получили какой-то перепад давления на каждом из каналов. При этом в третьем отборе, например, давление опустилось ниже атмосферного для «обеспечения» заданного расхода.

Однако на практике часты ситуации, когда начальные параметры схемы, заданные геометрические свойства и граничные условия не так близко сочетаются или вообще друг другу не подходят (как в примере с формулой II закона Ньютона и отрицательной массой), тогда гидравлический решатель NS не может справиться с постановкой задачи, и решение расходится (схема становится неустойчивой и либо в некоторых узлах давление выходит в нижнее ограничение в 1000 Па, либо улетает в плюс бесконечность). Например, вы можете «случайно» ошибиться и задать расход в третьем отборе не -0.2 , а -2 кг/с. При этом

схема не сможет обеспечить такой же расход в канале данного отбора (не хватит перепада давления и в канале диаметром 1 см, который задан, не сможет установиться такой расход), и давление в узле, к которому подключена такая подпитка, уйдет почти сразу в $1e3$ Па. Схема при этом останется «работоспособной», но величина давления $1e3$ Па – сигнал пользователю кода HS, что он вышел за пределы моделирования. В другой ситуации вы можете увидеть или скачки давлений, температур и/или расходов, и надо отличать такой «аварийный» и, как правило, неверный расчет от правильного, когда расчетная схема «сошлась» и все балансы (массы, энергии) в стационарных и переходных режимах соблюдаются.

Обратите внимание, что в процессе тестового расчета модель вышла на стационарный режим (то есть в такой режим, в котором параметры не меняются или меняются незначительно в малой окрестности равновесного состояния) в течение нескольких первых секунд расчета. В более сложных схемах бывает так, что требуется подождать 60...600 секунд, а иногда и более, для того чтобы схема вышла на т. н. «стационар». Случается что схема не может выйти в стационарный режим (например, переполняется или опустошается бак, система совершает некоторые сильные колебания вокруг точки равновесия, или вообще набранная модель как система неустойчива, или выбранный шаг интегрирования слишком велик и не позволяет численной схеме сойтись).

Давайте подробнее рассмотрим этот факт – выхода на стационар – для набранной, относительно простой пока схемы, для чего построим график давлений во внутренних узлах схемы. Для этого:

- выделите внутренние узлы вдоль проточной части от подпитки до граничного узла (исключая его). Чтобы выделить узлы, нажмите клавишу **Shift** на клавиатуре и левой кнопкой мыши прощелкайте 6 узлов, с зажатой клавишей **Shift**, и узлы выделятся совместно, подсветившись красными прямоугольниками, см. рис. 2.2.8;
- далее на любом из выделенных узлов нажмите правую кнопку мыши, в появившемся контекстном меню выберите пункт **Свойства**;
- в открывшемся окне свойств убедитесь, что в заголовке будет перечислено 6 имен узлов. В нашем случае, так как мы ставили узлы последовательно на схему слева направо, они имеют имена Node_1, Node_2 и т. д. до Node_6, см. рис. 2.2.9;
- перейдите на вкладку **Параметры**;
- выберите одну строчку с параметром **Давление, Па** (параметр с именем **p**);
- нажмите внизу кнопку с графиком (рис. 2.2.9).

После выполнения этих действий в проекте появится новое графическое окно с временным графиком, в котором будет выведено 6 параметров, а именно: Node_1_p, Node_2_p, Node_3_p и т. д. Почему это важно: в дальнейшем нам придется для отладки выводить те или иные графики, и механизм их создания мы уже не будем расписывать так подробно. Сейчас нам потребуется график давлений в узлах для наблюдения, оценки и анализа переходного процесса выхода расчетной схемы в стационарное состояние.

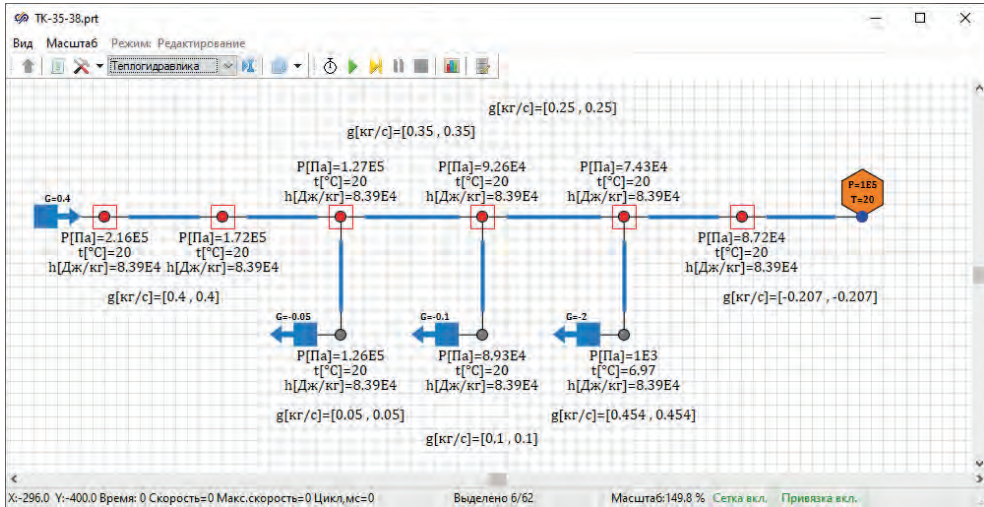


Рисунок 2.2.8 Выделение нескольких узлов для организации графика

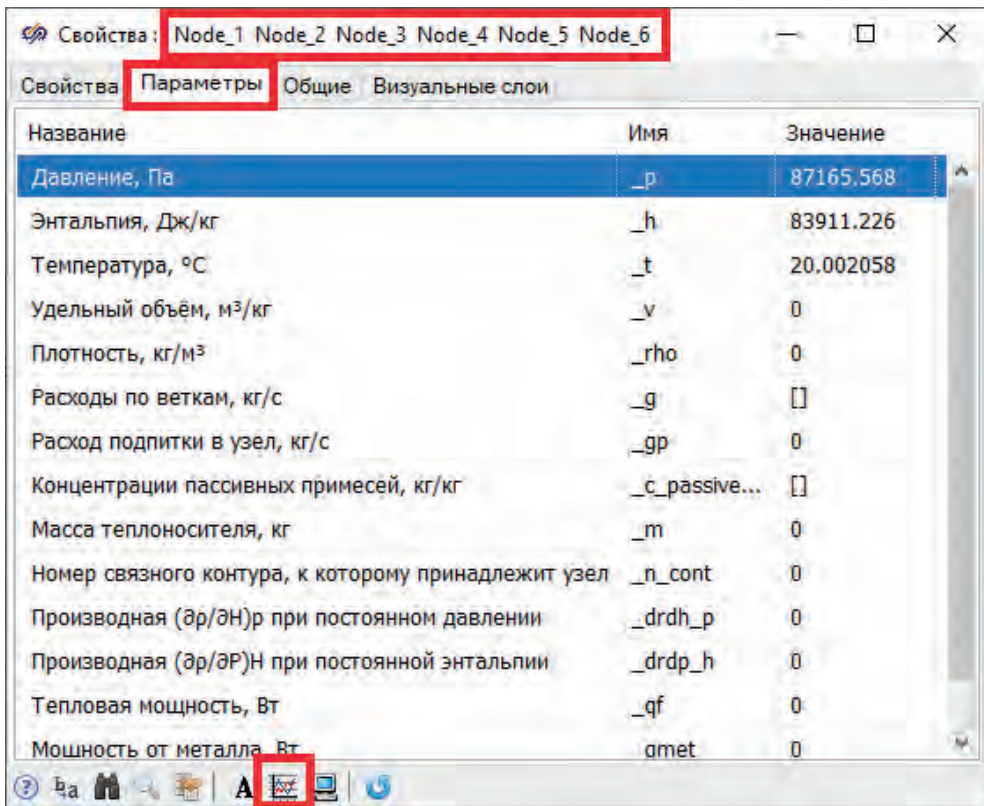


Рисунок 2.2.9 Выбор нужного параметра у нескольких узлов

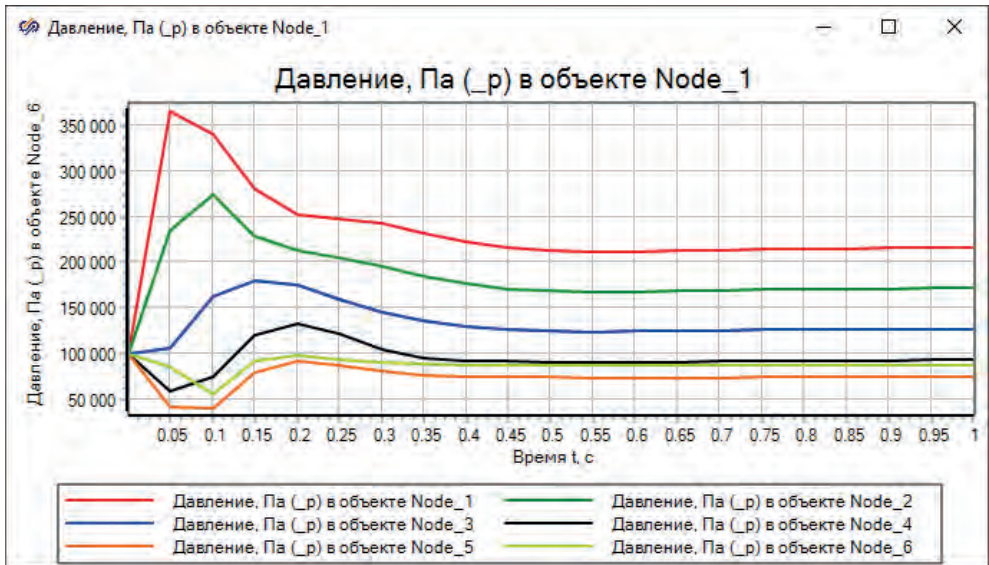


Рисунок 2.2.10 Процесс при максимальном шаге = 0.05 секунды

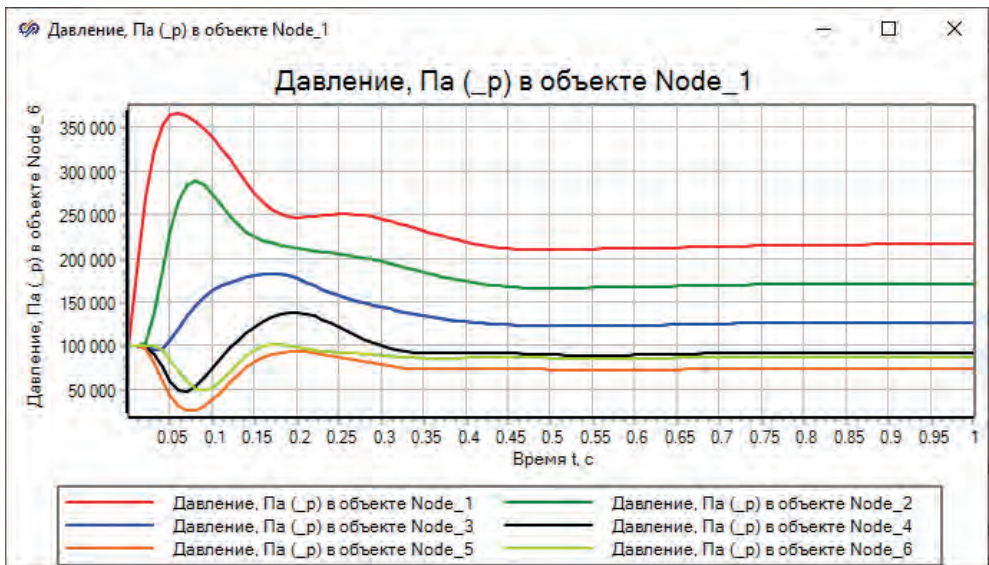


Рисунок 2.2.11 Процесс при максимальном шаге = 0.01 секунды

Если в параметрах расчета установить конечное время расчета равным 1 секунде (примерно за это время достигается стационарное состояние), шаг расчета и шаг синхронизации оставить 0.05 секунды, запустить на расчет, то вы получите график, как на рис. 2.2.10. При этом видны изломы и не очень адекватное поведение параметров в переходном процессе (хотя схема в итоге сошлась и устойчива). Если поставить максимальный шаг расчета равным 0.01 секунды, получите график, близкий к рис. 2.2.11. Там тоже есть изломы, и по факту это кусочно-линей-

ные графики, т. к. они выведены с шагом 0.01 секунды. Но они уже гораздо лучше визуально отображают переходной процесс, который произошел в узлах схемы. На практике для большинства теплогидравлических задач хватает шага расчета порядка 0.01...0.05 секунды для адекватного описания всех процессов. В редких случаях, или в специфичных задачах, требуются более мелкие шаги. Мы будем использовать далее шаг 0.05 секунды, поскольку не будем рассматривать какие-то быстро протекающие процессы, такого шага дискретизации нам хватит.

Что мы можем сказать по полученному графику переходного процесса, и почему он получился вообще? Дело в том, что в каждом проставленном блоке – в узлах и в каналах – есть ряд свойств, которые можно отнести к начальным условиям. Для узлов это начальное давление и начальная температура (или начальная энтальпия – в коде NS можно задаваться либо температурой, либо энтальпией среды). Для каналов – тоже начальное давление и начальная температура (энтальпия) для ячейки канала, а также начальный расход среды в канале. По умолчанию в блоках проставлено давление $1e5$ Па и температура 20 °С. Для каналов стоит автоматическое определение начальных условий, и в них код сам вычисляет давления в ячейках вдоль канала, а расход устанавливает нулевым в начальный момент времени. Далее все параметры пересчитываются на каждом шаге расчета. Подпитки начинают свою работу сразу, на первом же шаге расчета, граничный узел тоже не меняет своего давления, а остальным блокам приходится «подстраиваться» под заданные граничные условия. Поэтому требуется некоторое время расчета для этой подстройки, а на графике мы видим, что все 6 давлений стартуют со значения в $100\,000$ Па и постепенно выходят на равновесные (для заданных расходов в подпитках и для заданного давления в конце тракта) значения.

В сложных моделях, для того чтобы не ждать каждый тестовый запуск этого выхода на стационарное состояние и из-за практической невозможности корректно задать начальные параметры в каждом блоке (на это потребуется колоссальное время, количество блоков может достигать нескольких тысяч), используют механизм т. н. рестарта. Пользователь дожидается выхода на стационар (один раз), когда произойдет стабилизация параметров, далее записывается исходное состояние (рестарт), и схема настраивается на запуск не с начальных свойств, записанных в блоках схемы, а с тех значений, которые записаны в рестарте. Это кратно сокращает время на разработку и отладку модели, потому что не требуется каждый запуск ждать выхода в равновесное состояние. Кроме того, в сложных моделях таких равновесных состояний может быть не одно, а 10, 20 или 100. Они записаны в файлы с разными именами, и модель можно запускать с какого-то выбранного состояния. В блоках мы можем задать только одно начальное состояние.

Ради интереса и практики вы можете задать давления по узлам и хотя бы расходы по каналам, более близкие к тем значениям, которые получаются в стационарном состоянии, и увидеть, что схеме требуется уже меньше времени, чтобы к нему прийти. Если задать идеально верно все начальные свойства, то схема сразу запустится на расчет с равновесных значений, а переходного процесса на графике не будет.

2.3 ПРОЦЕСС РАСШИРЕНИЯ ПАРА

На данном этапе мы построили только гидравлическую схему проточной части и никак ее не параметризовали. Просто проверили верность топологии на аб-

страктных параметрах расходов холодной воды. А для верной работы этой схемы на номинальных параметрах турбины следует разместить еще 4 блока типа **HS – ступень турбины**, задать верно их характеристики, разместить 1 блок типа **HS – Ротор**, 1 блок типа **HS – Электрогенератор**, верно все соединить и задать свойства и начальные параметры схемы, затем привести все в соответствие с одним из номинальных режимов ПТУ.

Однако, прежде чем это проделать, следует из исходных данных правильным образом выбрать нужную информацию для задания характеристик ступеней турбины и для лучшего понимания, какие именно параметры пара должны быть вдоль проточной части. В исходных данных [2] приведено несколько режимов работы ПТУ: спецификационный (35 МВт эл.), режим максимальной тепловой мощности (22,2 МВт эл.), режим максимальной электрической мощности (38,5 МВт), номинальный теплофикационный, номинальный конденсационный. В работе [1] приведены аналогичные режимы (конденсационный и теплофикационный номинальные с 35 МВт эл., конденсационный максимальный, 38 МВт эл., см. рис. 2.3.1 а, б, в). Выберем один из них, на который будем настраивать модель, – пусть это будет спецификационный режим, в котором электрическая мощность составляет 35 МВт, в наличии одно из высоких значений расхода пара из регулируемого теплофикационного отбора (66.6 т/ч), нулевой расход пара на пиковый подогреватель. На рис. 2.3.1 наиболее близкий режим к выбранному – это «б», теплофикационный номинальный режим.

Для задания характеристик ступеней турбины в коде HS нам требуется знать как минимум параметры пара на входе и выходе каждой ступени, а также потери в ступени. Причем в общем случае это должно быть известно при разных расходах теплоносителя через ступень, от нулевого до номинального, и при разных частотах вращения. Эти данные далеко не всегда есть в наличии, поэтому приведем здесь упрощенный способ задания характеристики, пригодный в том случае, когда у нас есть параметры пара только на входе и выходе из турбины и величины давления пара в отборах.

Основываясь на данных [2], будем строить процесс расширения пара в ПТУ при следующих параметрах спецификационного режима:

Наименование параметра	Значение
Электрическая мощность генератора при КПД генератора 98 %	35.0 МВт
Номинальная частота вращения ротора	50 об/с (3000 об/мин)
Абсолютное давление свежего пара перед ПТУ	35 кгс/см ² (3.43 МПа)
Температура свежего пара перед ПТУ	285 °С
Расход свежего пара на турбину	220 т/ч (61.1 кг/с)
Абсолютное давление пара в I отборе	9.2 кгс/см ² (0.913 МПа)
Абсолютное давление пара во II отборе	3.64 кгс/см ² (0.357 МПа)
Абсолютное давление пара в III отборе	0.96 кгс/см ² (0.094 МПа)

Наименование параметра	Значение
Абсолютное давление пара в конденсаторе	0.051 кгс/см ² (0.005 МПа)
Расход пара из I отбора (совпадает с расходом греющего пара на ПВД-3)	18.4 т/ч
Расход пара из регулируемого теплофикационного II отбора (расход греющего пара на ПВД-2, плюс расход на другие нужды)	66.6 т/ч (13+53.6) т/ч
Расход пара из III отбора (совпадает с расходом греющего пара на ПНД-1)	10 т/ч

Примечание: обратите внимание, что часть расхода из второго отбора (из 66.6 т/ч) идет на ПВД-2, в размере 13 т/ч.

Из исходных данных становится очевидно, что на турбину поступает **220 т/ч** свежего пара. После первого отбора расход пара должен составлять $220 - 18.4 = 201.6$ т/ч. После второго отбора $220 - 18.4 - 66.6 = 135$ т/ч. После третьего отбора расход пара будет равным $220 - 18.4 - 66.6 - 10 = 125$ т/ч, и это расход пара, поступающего в итоге в конденсатор (значит, с этим же расходом конденсатные насосы должны откачивать конденсат, это пригодится далее при разработке модели конденсатора). Таким образом, мы получили, что через 4 ступени турбины (поскольку отборов три, мы будем моделировать турбину при помощи 4 блоков типа «ступень турбины», эквивалентным образом, хотя в действительности ступеней может быть больше) будет идти расход пара, равный соответственно 220, 201.6, 135 и 125 т/ч.

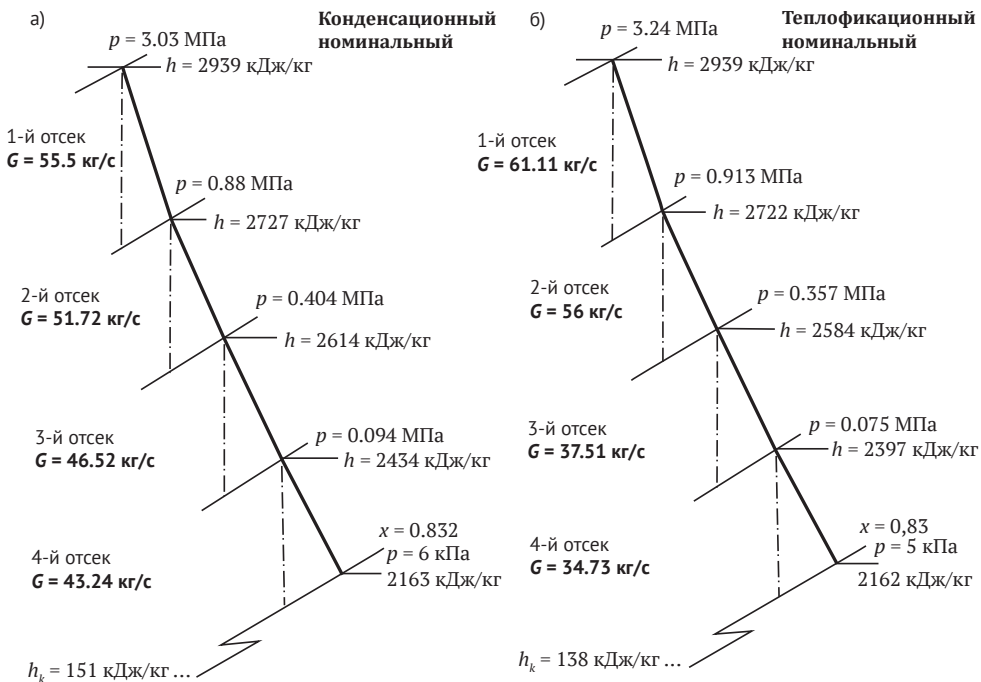


Рисунок 2.3.1 Процессы расширения пара в турбине для расчетных режимов в координатах h,s -диаграммы: а) $N = 35$ МВт эл., $Q = 0$; б) $N = 35$ МВт эл., $Q = 29$ МВт; в) $N = 38$ МВт эл., $Q = 0$

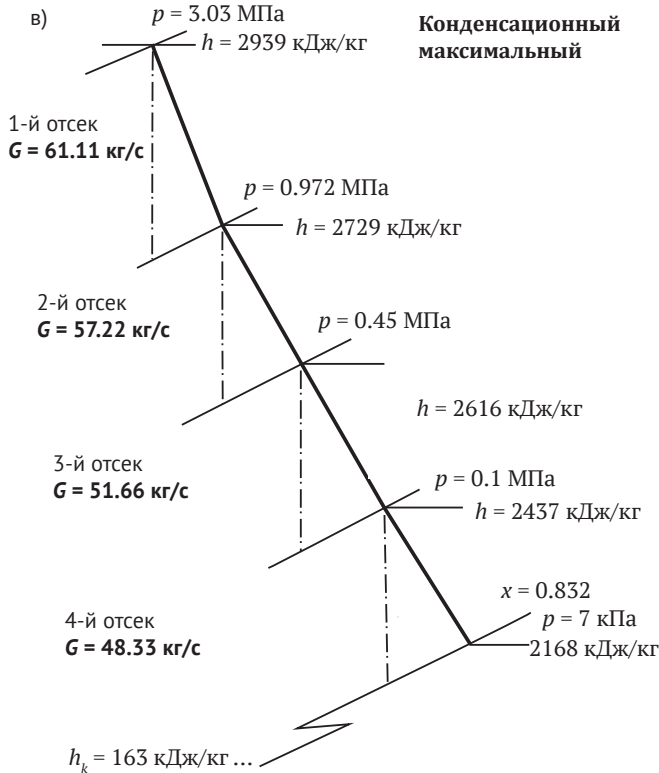


Рисунок 2.3.1 (окончание)

Предположим, что нам неизвестен процесс действительного расширения пара (как указано на рис. 2.3.1 а, б, в), а известны только начальные параметры пара, давления в отборах и итоговая электрическая мощность на генераторе. Основываясь на этих данных, мы можем построить изоэнтропийную линию начиная из точки $p_0 = 3.43 \text{ МПа}$, $t_0 = 285 \text{ }^\circ\text{C}$ и до давления в конденсаторе 0.005 МПа , отмечая на ней давления в отборах и записывая величину энтальпии. Можно воспользоваться или бумажной версией h,s -диаграммы, или какой-либо из электронных версий.

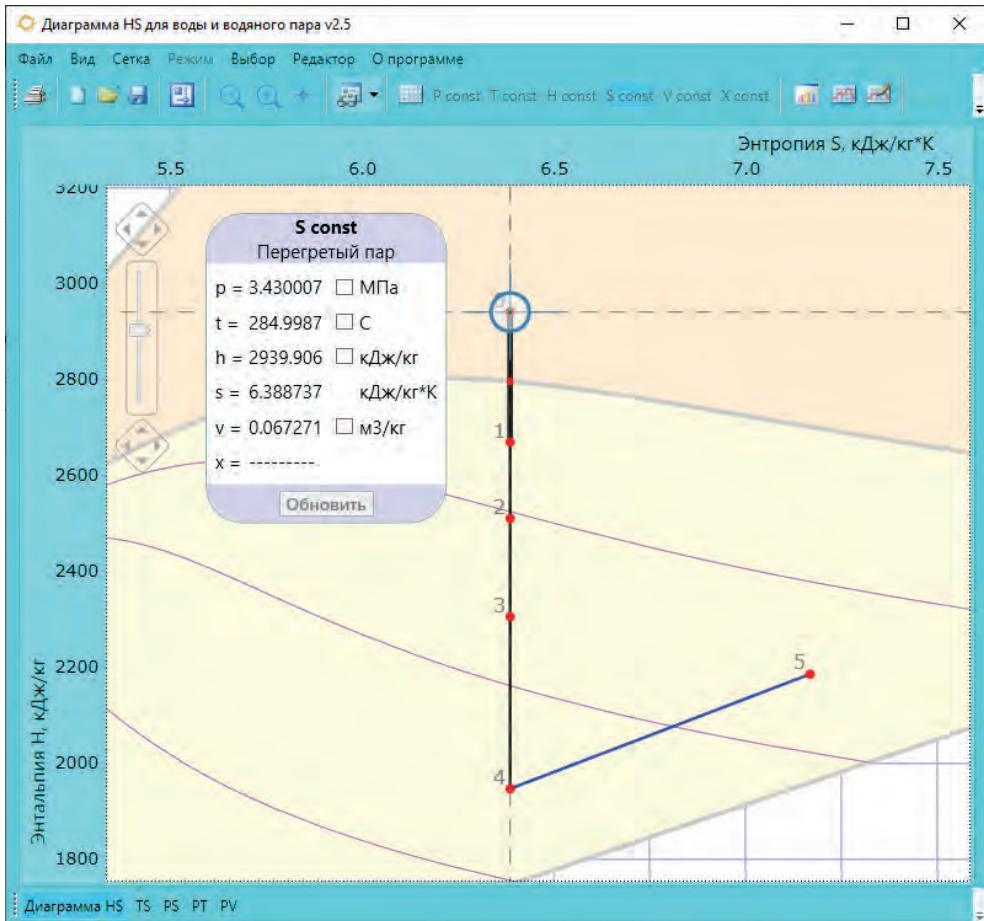


Рисунок 2.3.2 Свежий пар на турбину

Например, на рис. 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5 и 2.3.6 приведены скриншоты из программы «*Диаграмма HS для воды и водяного пара v2.5.2017.125*». Этот максимальный теоретический (располагаемый) теплоперепад в действительности не весь перейдет в механическую мощность, а только его часть будет использована для раскрутки ротора турбины и электрогенератора. Какая именно часть – мы определим далее подбором, итерационным способом.

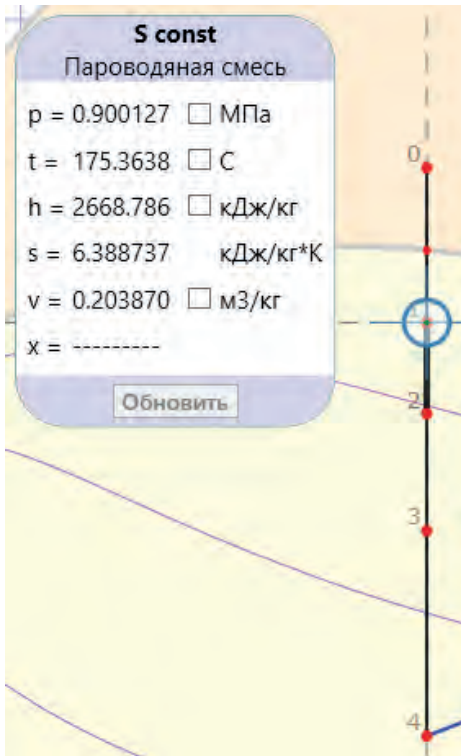


Рисунок 2.3.3 Давление I отбора

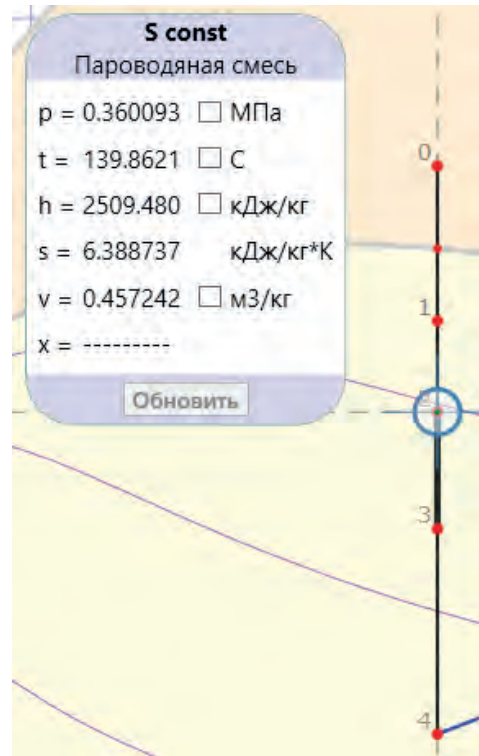


Рисунок 2.3.4 Давление II отбора

По рисункам видно, что энтальпия пара (в идеальном варианте) будет равна от входа к выходу из проточной части, по точкам 0, 1, 2, 3, 4 соответственно: 2940, 2669, 2509, 2305 и 1946 кДж/кг. В действительности энтальпия пара будет несколько выше, кроме нулевой точки, однако по рис. 2.3.7 видно, что более высокое значение энтальпии (около 2185 кДж/кг, сравните также с рис. 2.3.1, взятым из [1]) для реального процесса всего на 10–15 % выше, чем наша «идеальная» энтальпия 1946 кДж/кг. Поэтому в первом приближении построим характеристики ступеней турбины, основываясь на идеальном процессе, сделав просто КПД ступеней пониже. А затем, второй итерацией, когда в модели мы получим уже более реалистичные (приближенные к реальному процессу расширения пара) значения энтальпий в отборах и на выхлопе турбины, скорректируем характеристики ступеней.

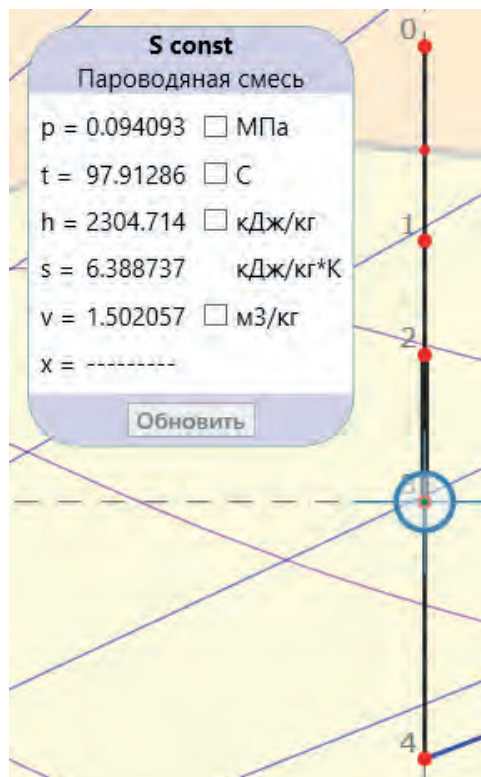


Рисунок 2.3.5 Давление III отбора

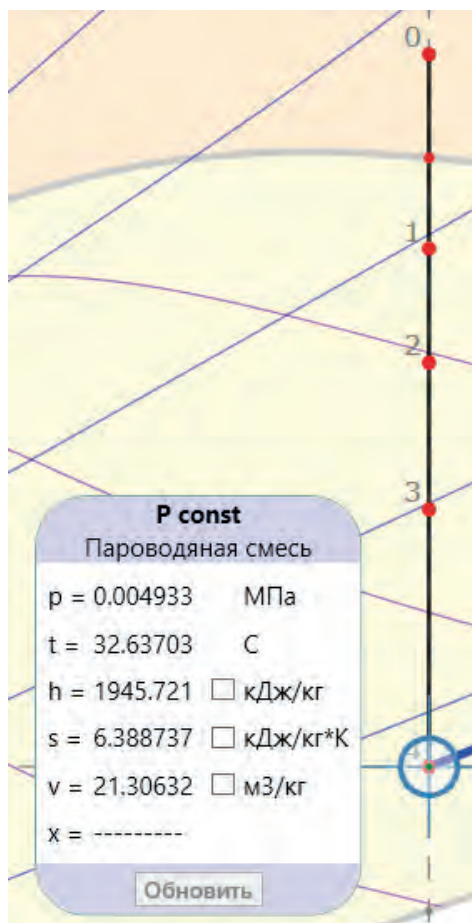


Рисунок 2.3.6 Давление конденсатора

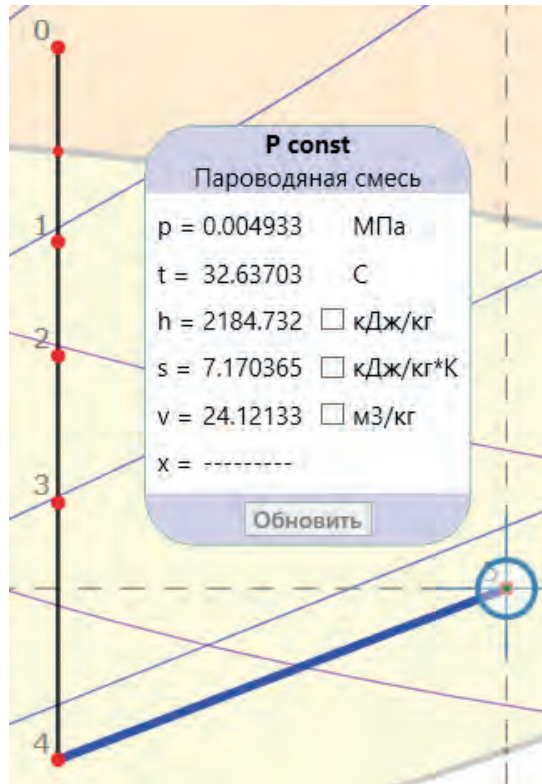


Рисунок 2.3.7 Примерная точка конца действительного процесса расширения пара в турбине (изобара от точки 4)

Отметим, что если количество отборов равно 3, то количество процессов «понижения параметров пара» равно 4 (линии 0–1, 1–2, 2–3 и 3–4). Именно этим процессам, или линиям, будут соответствовать блоки типа **НС – Ступень турбины**, которые далее мы разместим на схеме. Количество отборов, равное трем, мы уже сделали ранее при нодализации схемы. Если бы у нас была турбина с другими исходными данными, с другим количеством ступеней, то и расчетную схему мы бы делали по-другому.