**HS – Пароводяной компенсатор давления**

**1. Общее описание блока**

Блок теплогидравлики «Пароводяной компенсатор давления» описывает нестационарные теплогидравлические процессы в замкнутом сосуде с наличием парового объёма над уровнем жидкости и предназначен для моделирования различных теплообменных устройств в атомных и тепловых энергетических установках, например, парогенераторов, конденсаторов, смешивающих и поверхностных подогревателей, и т.д.

В расчётной модели предусмотрено:

- местоположение подводящих и отводящих патрубков произвольно по высоте сосуда;

- площадь поперечного сечения сосуда может быть переменной по высоте;

- в объёме сосуда могут находиться нагреватели и другие теплопроводящие конструкции, например, трубные пучки;

- в паровом объёме сосуда может находиться спринклерное устройство или другое устройство впрыска жидкости.

При описании нестационарного теплопереноса в паро-водяном сосуде используются следующие допущения:

- давление во всех точках сосуда считается постоянным, но при расчёте давления в точках подключения патрубков учитывается вес столба жидкости;

- расчёт парового и водяного объёмов осуществляется в сосредоточенных параметрах;

- пар в паровом объёме может быть перегретым и насыщенным, охлаждение насыщенного пара приводит к практически мгновенной его конденсации в паровом объёме; в водяном объёме пар может быть только насыщенным;

- вода в водяном объёме может быть недогретой и на линии насыщения, перегрев воды на линии насыщения приводит к практически мгновенной генерации пара в водяном объёме; учитывается конденсация пара, поступающего в объём недогретой жидкости;

- отсутствует захват пара жидкостью, поступающей в выходящие патрубки, расположенные под уровнем жидкости; в выходные патрубки, расположенные над уровнем жидкости, поступает чистый пар;

- впрыскиваемая из спринклерного устройства вода практически мгновенно нагревается до температуры насыщения;

- учитывается конденсация пара на зеркале воды, на стенке корпуса сосуда и на теплообменных устройствах в паровом объёме.

Расчётная схема паро-водяного сосуда показана на рисунке 1.



Рисунок 1 - Расчётная схема паро-водяного сосуда под давлением

Обозначения:

, - расход жидкости (fluid) и пара (vapor) в i-ом подключённом патрубке;

- расход жидкости через спринклерное устройство;

- выход пара из объёма жидкости в паровой объём;

, – скорость образования и конденсации пара в водяном объёме;

, , , - интенсивность конденсации пара на зеркале жидкости, на стенке, в объёме пара и на струях впрыска соответственно;

, - тепловой поток от нагревателей, передаваемый к объёму жидкости и пара соответственно;

, - тепловые потоки в стенку сосуда со стороны водяного и парового объёмов соответственно;

h - физический уровень теплоносителя в сосуде;

- расстояние от дна сосуда до оси i-го подключенного патрубка.

**2. Свойства блока**

| **Свойство** | **Обозначение** | **Описание** | **Диапазон допустимых значений, значение по умолчанию** |
| --- | --- | --- | --- |
| Тепловая связь со стенкой изнутри | isHeatIn | Индикатор наличия тепловой связи объёма бака с тепловой структурой, расположенной внутри бака | Да/Нет  По умолчанию - «Нет»  Пока что теплообмен с этой стенкой в баке не учитывается |
| Тепловая связь со стенкой снаружи | isHeatOut | Индикатор наличия тепловой связи объёма бака с тепловой структурой, расположенной снаружи бака, которая позволяет моделировать теплообмен воды и пара в баке со стенкой бака | Да/Нет  По умолчанию - «Нет» |
| Количество тепловых портов (для связи с трубными пучками) | Nheatport\_tube\_bundle | Индикатор наличия тепловых связей объёма бака с трубными пучками, расположенными в баке. При помощи трубных пучков можно моделировать нагрев и охлаждение жидкости и пара в баке, конденсацию в паровом объёме и т.д. | Целое число  По умолчанию - 0 |
| Объем бака, м3 | V | Общий объём внутреннего пространства бака, содержащий воду и пар | Действительное число > 0  По умолчанию - 3.927 м3 (цилиндрический бак внутренним диаметром 1 м высотой 5 м) |
| Высотная отметка днища, м | Z | Высотная отметка днища бака, определяющая его высотное расположение в рамках моделируемой теплогидравлической схемы | Произвольное действительное число  По умолчанию - 0 м |
| Тип геометрии | Geom | Вид геометрии моделируемого бака. Позволяет моделировать баки в виде вертикального цилиндра, горизонтального цилиндра, а также с изменяющимся по высоте диаметром, который задаётся в виде кусочно-постоянной функции | Вертикальный цилиндр/Горизонтальный цилиндр/Произвольный  По умолчанию – вертикальный цилиндр |
| Зависимость уровня от объёма жидкости L=L(V) | L\_V | Для прозвольного типа геометрии в виде матрицы задаётся зависимость высотной отметки уровня жидкости в баке (относительно днища бака), м от объёма жидкости, м3. Матрица имеет вид [[V0,V1,V2,…];[L0,L1,L2,…]], то есть в первой строке задаются объёмы жидкости, а во второй – соответствующие значения высотной отметки уровня. При расчёте положение уровня в промежуточных точках определяется при помощи линейной интерполяции по заданной матрице. | Матрица действительных чисел  По умолчанию –  [[0,10];[0,10]]  Нужно добавить проверки (объём не меньше нуля, уровень не меньше нуля, размерности строк совпадают) |
| Внутренний диаметр, м | Din | Для цилиндрической геометрии бака задаётся внутренний диаметр бака | Действительное число > 0  По умолчанию - 1 м |
| Начальное давление, Па | P0 | Давление среды в баке в начальный момент времени | Действительное число > 0  По умолчанию – 105 Па |
| Начальный недогрев жидкости до Ts, °С | Tf\_0 | Недогрев жидкости до линии насыщения в начальный момент времени | Действительное число  По умолчанию – 0 °С |
| Начальный перегрев пара относительно Ts, °С | Tv\_0 | Перегрев пара выше линии насыщения в начальный момент времени | Действительное число  По умолчанию – 0 °С |
| Начальная объемная доля 1-й области | V1\_0 | Свойство определяет, какая доля общего объёма бака заполнена жидкостью в начальный момент времени | Действительное число > 0 и < 1  По умолчанию – 0,5 |
| Начальное объемное паросодержание в 1-й области | Fi\_0 | Свойство определяет, какая доля объёма первой области заполнена паром в начальный момент времени (в модели в первом объёме предполагается возможность существование смеси жидкости и пара) | Действительное число и  По умолчанию – 0 (то есть в первом объёме находится вода на линии насыщения, не содержащая пара) |
| Кол-во элементов разбиения по высоте | Nh | Количество элементов разбиения бака по высоте. Используется при моделировании связи бака с внутренней или наружной стенками (свойства isHeatIn, isHeatOut). | Целое число  По умолчанию - 1 |
| Длины элементов разбиения, м | deltaH | Длины элементов разбиения бака по высоте. Используются при моделировании связи бака с внутренней или наружной стенками. При расчёте отслеживается положение уровня жидкости в баке относительно этих элементов разбиения, и соотвественно определяется, какая часть стенки омывается жидкостью, а какая – паром | Массив действительных числе, каждое из которых > 0. Размерность массива должна быть равна значению свойства Nh.  По умолчанию – [5.0] |
| Нижняя отметка трубного пучка (относительно днища бака), м | Z\_bot\_tube\_bundle | Массив нижних высотных отметок связанных с баком трубных пучков относительно днища бака. При моделировании считается, что с баком могут быть связаны цилиндрические горизонтальные трубные пучка, для которых требуется задание высотных отметок их расположения в баке. При расчёте отслеживание положение уровня жидкости в баке относительно трубных пучков и определяется, в жидкости, в паре, или частично в жидкости, а частично в паре находится каждый трубный пучок | Массив действительных чисел, каждое из которых . Размерность массива должна быть равно значению свойства Nheatport\_tube\_bundle.  По умолчанию – [] (пустой массив) |
| Верхняя отметка трубного пучка (относительно днища бака), м | Z\_top\_tube\_bundle | Массив верхних высотных отметок связанных с баком трубных пучков относительно днища бака. | Массив действительных чисел, каждое из которых , и, кроме того, соответствующей нижней высотной отметки трубного пучка. Размерность массива должна быть равно значению свойства Nheatport\_tube\_bundle.  По умолчанию – [] (пустой массив) |
| Определяющий размер трубного пучка (для теплообмена), м | de\_tube\_bundle | Массив определяющих размеров для расчёта теплообмена с трубными пучками (смотри описание замыкающих соотношений) | Массив действительных чисел, каждое из которых > 0. Размерность массива должна быть равно значению свойства Nheatport\_tube\_bundle.  По умолчанию – [] (пустой массив) |
| Коэф. теплоотдачи на зеркале, Вт/(м2∙К) | alfa\_mir | Коэффициент теплоотдачи, определяющий тепловой поток при конденсации пара из парового объёма на границе раздела жидкости и пара в баке | Действительное число .  По умолчанию – 70000 Вт/(м2∙К) |
| Попр. множители для коэф. теплоотдачи от трубных пучков | k\_alfa\_tube\_bundle | Массив поправочных множителей, на которые умножаются вычисленные по соответствующим замыкающим соотношениям (смотри описание замыкающих соотношений) коэффициенты теплоотдачи для каждого трубного пучка. При помощи подбора этих коэффициентов можно попробовать добиться соответствия расчётных значений коэффициентов теплоотдачи требуемым значениям, которые известны, например, из эксперимента, или из других источников | Массив действительных чисел, каждое из которых . Размерность массива должна быть равно значению свойства Nheatport\_tube\_bundle.  По умолчанию – [] (пустой массив) |

**3. Параметры блока**

| **Параметр** | **Обозначение** | **Описание** |
| --- | --- | --- |
| Давление, Па | \_p | Действительное число.  Текущее расчётное значение давления в баке |
| Весовой уровень, м | \_l | Действительное число.  Текущее расчётное значение весового уровня в баке. Весовой уровень определяется в модели по следующему уравнению:  где – физический уровень первого объёма;  – плотность жидкости в первом объёме;  – плотность пара в первом объёме;  – объёмное паросодержание в первом объёме.  Этот уровень соответствует уровню жидкости, имеющей ту же массу, что и пароводяная смесь в первом объёме |
| Физический уровень, м | \_level | Действительное число.  Физический уровень границы раздела первого и второго объёмов бака, определяемый по объёму пароводяной смеси в первом объёме |
| Объемное паросодержание | \_fi | Действительное число.  Текущее расчётное значение объёмного паросодержания в первом объёме. Определяется по уравнению:  где – масса пара в первом объёме (в объёме пароводяной смеси).  Показывает, какую долю от первого объёма занимает пар |
| Объем 1-й области, м3 | \_vol1 | Действительное число.  Текущее расчётное значения объёма пароводяной смеси в баке |
| Объем 2-й области, м3 | \_vol2 | Действительное число.  Текущее расчётное значение объёма пара в баке |
| Энтальпия жидкости в 1-й области, Дж/кг | \_h\_f1 | Действительное число.  Текущее расчётное значение удельной энтальпии воды в первом объёме |
| Температура жидкости в 1-й области, °С | \_t\_f1 | Действительное число.  Текущее расчётное значение температуры воды в первом объёме |
| Плотность жидкости в 1-й области, кг/м3 | \_r\_f1 | Действительное число.  Текущее расчётное значение плотности воды в первом объёме |
| Масса жидкости в 1-й области, кг | \_m\_f1 | Действительное число.  Текущее расчётное значение массы воды в первом объёме |
| Массовое паросодержание в водяном объёме | \_Xf | Действительное число.  Относительная энтальпия, определённая по давлению в баке и удельной энтальпии воды в водяном объёме |
| Энтальпия пара в 1-й области, Дж/кг | \_h\_v1 | Действительное число.  Текущее расчётное значение удельной энтальпии пара в первом объёме |
| Температура пара в 1-й области, °С | \_t\_v1 | Действительное число.  Текущее расчётное значение температуры пара в первом объёме |
| Плотность пара в 1-й области, кг/м3 | \_r\_v1 | Действительное число.  Текущее расчётное значение плотности пара в первом объёме |
| Масса пара в 1-й области, кг | \_m\_v1 | Действительное число.  Текущее расчётное значение массы пара в первом объёме |
| Энтальпия пара во 2-й области, Дж/кг | \_h\_v2 | Действительное число.  Текущее расчётное значение удельной энтальпии пара во втором объёме |
| Температура пара во 2-й области, °С | \_t\_v2 | Действительное число.  Текущее расчётное значение температуры пара во втором объёме |
| Плотность пара во 2-й области, кг/м3 | \_r\_v2 | Действительное число.  Текущее расчётное значение плотности пара во втором объёме |
| Масса пара во 2-й области, кг | \_m\_v2 | Действительное число.  Текущее расчётное значение массы пара во втором объёме |
| Массовое паросодержание в паровом объёме | \_Xv | Действительное число.  Относительная энтальпия, определённая по давлению в баке и удельной энтальпии пара в паровом объёме |
| Сумма расходов жидкости через патрубки в/из 1-й области, кг/с | \_sGf1 | Действительное число.  Сумма входящих и выходящих расходов жидкости в первый объём бака. Суммирование выполняется по всем подлкюченным к баку узлам, для которых выбран тип узла – «Обычный» (см. описание блока «HS – Узел компенсатора»). По параметрам в узле определяется, какую долю от поступающего расхода составляет вода, а какую - пар. Расход воды из всех узлов (назависимо от их высотного расположения) направляется в первый объём бака. В случае, если расход отрицательный, то есть уходит из бака, то учитывается высотное расположение узла относительно уровня пароводяной смеси в баке. Если узел оказывается под уровнем, то расход из первого объёма отводится в этот узел |
| Сумма расходов пара через патрубки в/из 1-й области, кг/с | \_sGv1 | Действительное число.  Сумма входящих расходов пара в первый объём бака. Суммирование выполняется по всем подлкюченным к баку узлам, которые расположены под уровнем жидкости. По параметрам в узле определяется, какую долю от поступающего расхода составляет вода, а какую - пар. В случае положительного направления расхода расход пара направляется в первый объём |
| Сумма расходов пара через патрубки в/из 2-й области, кг/с | \_sGv2 | Действительное число.  Сумма входящих и выходящих расходов пара во второй объём бака. Суммирование выполняется по всем подлкюченным к баку узлам, которые расположены над уровнем жидкости. По параметрам в узле определяется, какую долю от поступающего расхода составляет вода, а какую - пар. Расход пара направляется во второй объём бака. В случае, если расход отрицательный, то есть уходит из бака, то расход из второго объёма отводится в этот узел |
| Расход жидкости, поступающей через патрубки в 1-ю область, кг/с | \_Gf1 | Действительное число.  Сумма входящих и выходящих расходов воды в первый объём бака. Суммирование выполняется по всем подлкюченным к баку узлам независимо от их высотного расположения |
| Расход пара, поступающего через патрубки в 1-ю область, кг/с | \_Gv1 | Действительное число.  Сумма входящих и выходящих расходов пара в первый объём бака. Суммирование выполняется по всем подлкюченным к баку узлам, которые расположение под уровнем жидкости |
| Расход пара, поступающего через патрубки во 2-ю область, кг/с | \_Gv2 | Действительное число.  Сумма входящих и выходящих расходов пара во второй объём бака. Суммирование выполняется по всем подлкюченным к баку узлам, которые расположение над уровнем жидкости |
| Расход жидкости, поступающей через спринклеры, кг/с | \_Gspr | Действительное число.  Расход воды, поступающей через спринклеры. Суммирование выполняется по узлам, расположенным выше уровня жидкости, для которых выбран тип узла – «Спринклер». При этом если впрыскиваемая воды недогрета до линии насыщения, то прибавляется поступающий расход, а если впрыскиваемая вода перегрета выше линии насыщения, то часть расхода, равная G∙X (где X – массовое паросодержание подводимой пароводяной смеси), переходит в паровой объём, и, соответственно, поступающий в водяной объём расход уменьшается на эту величину |
| Расход пара из 1-й области во 2-ю, кг/с | \_G12 | Действительное число.  Выход пара из первого объёма во второй через границу раздела |
| Расход при конденсации на зеркале, кг/с | \_Gmir | Действительное число.  Расход конденсации пара на границе раздела водяного и парового объёмов бака |
| Расход конденсации пара на струях впрыска, кг/с | \_Gd | Действительное число.  Расход конденсации пара в паровом объёме, идущий на подогрев впрыскиваемой воды до линии насыщения, или, напротив, поступающий в паровой объём расход пара в случае впрыска перегретой выше линии насыщения жидкости |
| Расход конденсации пара на стенках компенсатора, кг/с | \_Gw | Действительное число.  Расход конденсации пара в паровом объёме бака, которая возникает при отвода тепла от парового объёма к наружной стенке бака |
| Расход конденсации пара на трубных пучках, кг/с | \_g\_cond\_tube\_bundle | Действительное число.  Расход конденсации пара в паровом объёме бака, которая возникает при отвода тепла от парового объёма к трубным пучкам |
| Расход конденсации пара на ТЭНах, кг/с | \_g\_cond\_ten | Действительное число.  Расход конденсации пара в паровом объёме бака, которая возникает при отвода тепла от парового объёма к ТЭНам |
| Расход конденсации пара в объёме жидкости, кг/с | \_Gcon | Действительное число.  Количество сконденсировавшегося в объёме жидкости (в первом объёме бака) пара в единицу времени. |
| Расход генерации пара в объёме жидкости, кг/с | \_Ggen | Действительное число.  Расход объёмной генерации пара в объёме жидкости, возникающей при перегреве жидкости выше линии насыщения |
| Расход конденсации пара в объёме пара, кг/с | \_Gvol | Действительное число.  Расход объёмной конденсации пара в паровом объёме, возникающей при охлаждении пара ниже линии насыщения |
| Тепловой поток в стенку компенсатора в 1-й области, Вт | \_Qwf1 | Действительное число.  Тепловая мощность, отводимая от водяного объёма бака к наружной стенке |
| Тепловой поток в стенку компенсатора во 2-й области, Вт | \_Qwv2 | Действительное число.  Тепловая мощность, отводимая от парового объёма бака к наружной стенке |
| Тепловой поток от нагревателей в 1-ю область, Вт | \_Qnf1 | Действительное число.  Тепловая мощность, подводимая от ТЭНов и трубных пучков к водяному объёму бака |
| Тепловой поток от нагревателей во 2-ю область, Вт | \_Qnv2 | Действительное число.  Тепловая мощность, подводимая от ТЭНов и трубных пучков к паровому объёму бака |
| Тепловой поток при конденсации на зеркале, Вт | \_Qmir | Действительное число.  Тепловая мощность, передаваемая от парового объёма к водяному через границу раздела |
| Расходная мощность жидкости, поступающей через патрубки в 1-ю область, Вт | \_GHf1 | Действительное число.  Сумма произведений входящих в бак расходов воды на соответствующие энтальпии. Учитываются только входящие расходы. Суммирование производится по всем узлам, для которых выбран тип узла – «Обычный», независимо от их высотного расположения |
| Расходная мощность пара, поступающего через патрубки в 1-ю область, Вт | \_GHv1 | Действительное число.  Сумма произведений входящих в водяной объём бака расходов пара на соответствующие энтальпии. Учитываются только входящие расходы. Суммирование производится по всем узлам, расположенным под уровнем |
| Расходная мощность пара, поступающего через патрубки во 2-ю область, Вт | \_GHv2 | Действительное число.  Сумма произведений входящих в паровой объём бака расходов пара на соответствующие энтальпии. Учитываются только входящие расходы. Суммирование производится по всем узлам, для которых выбран тип узла – «Обычный», расположенным над уровнем |
| Производная dP\dt, Па/с | \_dPdt | Действительное число.  Текущее расчётное значение производной давления в баке по времени |
| Производная dV1/dt, м^3/c | \_dV1dt | Действительное число.  Текущее расчётное значение производной первого объёма бака по времени |
| Производная dH\_f1/dt, Вт/кг | \_dHf1dt | Действительное число.  Текущее расчётное значение производной удельной энтальпии воды в первом объёме бака по времени |
| Производная dH\_v2/dt, Вт/кг | \_dHv2dt | Действительное число.  Текущее расчётное значение производной удельной энтальпии пара во втором объёме бака по времени |
| Производная dFi/dt, 1/c | \_dFidt | Действительное число.  Текущее расчётное значение производной объёмного паросодержания в первом объёме бака по времени |
| Энтальпия воды на линии насыщения, Дж/кг | \_Hfs | Действительное число.  Удельная энтальпия воды на линии насыщения при давлении в баке |
| Энтальпия пара на линии насыщения, Дж/кг | \_Hvs | Действительное число.  Удельная энтальпия пара на линии насыщения при давлении в баке |
| Шаг интегрирования, с | \_step | Действительное число.  Текущее значение шага по времени для модели пароводяного компенсаторая давления. При решении дифференциальных уравнений, составляющих математическую модель данного блока, используется метод решения SimInTech «Адаптивный 2». Этот метод автоматически выбирает шаг интегрирования, и для удобства этот шаг выведен в параметры блока |
| Коэффициенты теплоотдачи к стенке, Вт/(м^2\*К) | \_alfa | Массив действительных чисел размерностью Nh.  Текущие значения коэффициентов теплоотдачи со стороны среды бака на наружной стенке |
| Коэффициенты теплоотдачи для трубных пучков, Вт/(м^2\*К) | \_alfa\_tube\_bundle | Массив действительных числе размерностью Nheatport\_tube\_bundle.  Текущие значения усреднённых по элементам разбиения коэффициентов теплоотдачи со стороны среды бака на трубных пучках. Коэффициенты выводятся с учётом поправочных множителей k\_alfa\_tube\_bundle |

**4. Подключаемые блоки. Порты**

1) Для корректной работы блока к нему необходимо подключить хотя бы один блок «HS – Узел компенсатора». В этом узле в качестве теплоносителя должна быть выбрана вода.

2) К блоку возможно подключение наружной и внутренней тепловой структуры. Для этого необходимо задать свойства isHeatIn и/или isHeatOut как «Да». После этого у блока появятся необходимые тепловые порты.

Допускается подключение следующих блоков:

- «HS - Цилиндрическая толстая стенка»;

- «HS - Цилиндрическая толстая стенка с излучением»;

- «HS - Тонкая стенка тип 1»;

- «HS - Заданный тепловой поток на стенке»;

- «HS - Стенка с заданной температурой».

3) В случае задания ненулевого Nheatport\_tube\_bundle у блока появляются дополнительные тепловые порты, служащие для подключения трубных пучков. В настоящее время ограничений на типа подключаемых блоков не установлено. К этим портам могут быть подключены любые блоки, моделирующие тепловые структуры.

4) К блоку возможно подключение блоков «HS – ТЭН». Они просто устанавливаются на пароводяной компенсатор давления, и он становится для них блоком-владельцем.

**5. Физическая и математическая модель блока**

**5.1 Исходные уравнения для водяного объёма (расчётной области I)**

Для водяного объёма (расчётная область I) с учётом принятых допущений запишем уравнения сохранения массы воды и массы пара:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

где – то есть если патрубок расположен под уровнем жидкости, то расход пара в нём добавляется в первый объём.

Уравнение сохранения для энтальпии пароводяной смеси в первом объёме имеет вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.3) |

Здесь предполагается, что в отводящие патрубки поступает жидкость с энтальпией (то есть не со среднесмешанной энтальпией, а именно с энтальпией жидкости), т.е. уходящая жидкость не захватывает пар; конденсирующийся на зеркале жидкости пар обладает энтальпией парового объёма; пар во втором объёме конденсируется до состояния на линии насыщения и обладает энтальпией ; пар в первом объёме находится на линии насыщения и поэтому выходит во второй объём, имея энтальпию . Последний член в (1.3) следует из вывода уравнения сохранения энергии и соответствует работе сил давления (работе сжатия).

**5.2 Исходные уравнения для парового объёма (расчётная область II)**

Для парового объёма сосуда (II расчётная область) запишем уравнения сохранения массы и энтальпии пара:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.4) |

где – то есть если патрубок расположен над уровнем жидкости, то расход пара в нём добавляется во второй объём.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.5) |

где – отводимый от пара тепловой поток в случае конвекции (при конденсации тепловой поток уже учитывается в ).

Предполагается, что конденсирующийся на зеркале, на стенке, на трубных пучках и ТЭНах, а также на струях впрыска пар обладает энтальпией , а конденсирующийся в объёме пар уносит из объёма энтальпию .

**5.3 Преобразование исходных уравнений**

Раскроем производную в левой части уравнения (1.3):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.6) |

Подставим выражения для и из (1.1) и (1.2) в (1.3).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.7) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.8) |

Заметим, что справедливо следующее тождество

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.9) |

в чём можно убедиться прямой подстановкой. Подставляя (1.9) в (1.8) и раскрывая скобки, получим

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.10) |

Сделаем следующие замены

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.11) |
|  | (1.12) |
|  | (1.13) |

где – истинное объёмное паросодержание в водяном объёме. С учётом этих замен перепишем (1.10) в виде

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.14) |

После преобразований получим уравнение для первого расчётного объёма:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.15) |

Запишем уравнение для объёма первой расчётной области:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.16) |

Продифференцируем (1.16) по времени с учётом того, что удельный объём жидкости зависит от энтальпии жидкости и давления, а удельный объём пара (на линии насыщения) – только от давления. Получим

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.17) |

Для расчета истинного объёмного паросодержания в первой области продифференцируем по времени выражение для массы пара в первой области (1.12):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.18) |

Выразим отсюда производную паросодержания в первой области по времени

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.19) |

Уравнение для энтальпии второго расчётного объёма получается из совместного рассмотрения уравнений (1.4) и (1.5), с учётом того, что

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.20) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.21) |

Заметим, что выполняется следующее тождество

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.22) |

которое позволяет сократить запись. После преобразований получаем

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.23) |

Уравнение изменения давления в сосуде получим из условия постоянства его объёма

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.24) |

Продифференцируем уравнение (1.24) по времени с учётом уравнений состояния:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.25) |

Выразим из (1.25) производную давления:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.26) |

Расчет давления в точках подключения патрубков к внутреннему объему сосуда осуществляется по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.27) |

где , то есть учитывается вес столба пароводяной смеси в водяном объёме бака над точкой подключения патрубка.

При определении граничного паросодержания в выходных сечениях подключённых к сосуду патрубков предполагается, что захвата пара в отводящие патрубки, расположенные ниже физического уровня теплоносителя в сосуде, не происходит. Однако возможна ситуация, когда при горизонтальном расположении отводящего патрубка только часть сечения патрубка оказывается затопленной жидкостью. Объемное паросодержание на входе в данный патрубок в этом случае определяется из геометрических соображений (рисунок 2).

h

hpi

hs

α

Рисунок 2 – Случай, когда часть сечения патрубка находится под уровнем

В общем случае:



где  - доля сечения, занятая паром;

- площадь проходного сечения трубы;

 - радиус трубы.

;

.

**5.4 Замыкающие соотношения**

Для замыкания системы уравнений (1.15), (1.17), (1.19), (1.23) и (1.26) необходимо определить следующие величины:

- интенсивность конденсации пара в недогретой жидкости первой расчётной области;

- интенсивность генерации пара в водяном объёме при нарушении условия (то есть при перегреве жидкости выше линии насыщения);

- выход пара из водяного объёма в паровой;

- интенсивность конденсации пара на поверхности раздела парового и водяного объёмов;

- интенсивность конденсации пара в паровом объёме на стенке сосуда, на трубных пучках и ТЭНах;

, - тепловые потоки к стенке от парового и водяного объёмов соответственно;

- интенсивность конденсации пара на каплях разбрызгиваемой спринклерными устройствами воды;

- интенсивность конденсации пара в паровом объёме при нарушении условия (то есть при охлаждении пара ниже линии насыщения).

**5.5 Теплообмен в объёме жидкости**

Расчет интенсивности конденсации пара осуществляется по методике, предложенной применительно к конденсации насыщенного пара при его барботаже в объёме недогретой жидкости.

В соответствии с этой методикой

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.28) |

где - время всплытия пузырей;

.

При этом добавлено ограничение, что (т.е. что не может сконденсироваться больше пара, чем его входит через патрубки), которое следует из физического смысла.

Максимальный эквивалентный диаметр пузыря, который может существовать (не распадаясь) при барботаже в большом объёме жидкости, определяется соотношением

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.29) |

где – постоянная Лапласа.

Коэффициент теплообмена рассчитывается по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.30) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.31) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.32) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.33) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.34) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.35) |

- скорость всплытия одиночного пузыря.

Время всплытия пузырей определяется с использованием модели потока дрейфа:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.36) |

причём в качестве берётся уровень жидкости в сосуде;

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.37) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.38) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.39) |

Выход пара из области I в область II также определяется с использованием модели потока дрейфа:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.40) |

где – площадь поверхности раздела I и II областей;

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.41) |

- поправка на групповую скорость всплытия пузырей.

**5.6 Теплообмен в паровом объёме**

Тепловой поток при конденсации пара на поверхности раздела I и II областей определяется зависимостью

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.42) |

где коэффициент теплообмена задаётся в свойствах блока.

Расход конденсируемого на поверхности раздела пара определяется соотношением

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.43) |

Расчет конденсации пара на струях впрыска осуществляется в предположении, что нагрев впрыскиваемой воды до температуры насыщения происходит практически мгновенно. Тепло, необходимое для нагрева воды до температуры насыщения, образуется за счёт конденсации пара на струях впрыска

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.44) |

Тогда масса сконденсированного в единицу времени пара определится по формуле

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.45) |

где - энтальпия впрыскиваемой жидкости.

**5.7 Теплообмен со стенкой сосуда**

Теплообмен на внутренней поверхности корпуса сосуда осуществляется как со стороны водяного, так и со стороны парового объёмов сосуда.

Тепловой поток к стенке корпуса сосуда от водяного объёма определяется зависимостью:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.46) |

где - поверхность теплообмена между стенкой и водяным объёмом.

В случае, если температура стенки меньше температуры насыщения, то коэффициент теплообмена определяется зависимостью для свободно-конвективных течений. Используется формула Байлея:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.47) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.48) |

в качестве определяющего размера использовуется внутренний диаметр сосуда.

В случае, если температура стенки больше температуры насыщения, то коэффициент теплообмена определяется по формуле для кипения в большом объёме:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.49) |

где в качестве берётся тепловой поток на предыдущем шаге по времени; давление – в мегапаскалях.

В случае кипения вычисленное значение ограничивается снизу 104 и сверху 2,5∙105 Вт/(м2∙К).

Теплообмен между стенкой сосуда и паром в паровом объёме осуществляется в двух режимах - при свободной конвекции пара и в режиме конденсации пара на стенке :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.49) |

где

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.50) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.51) |

При свободной конвекции пара используется зависимость Байлея:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.52) |

Коэффициент теплообмена при конденсации пара определяется термическим сопротивлением пленки конденсата:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.53) |

Среднее значение коэффициента теплообмена при конденсации пара на стенке высотой L определяется по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.54) |

Расход конденсата, стекающего по стенке сосуда в водяной объём, определяется соотношением:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.55) |

**5.8 Теплообмен с трубными пучками**

В водяном объёме могут находиться горизонтальные трубные пучки. При температуре стенке ниже температуры насыщения используются формулы для свободной конвекции:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.56) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.57) |

где определяющий размер задаётся в свойствах блока (свойство de\_tube\_bundle).

В случае, если температура стенки больше температуры насыщения, то коэффициент теплообмена определяется по формулам для кипения на трубных пучках в большом объёме:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.58) |
|  | (1.59) |
|  | (1.60) |

В случае кипения вычисленное значение ограничивается снизу 104 и сверху 2,5∙105 Вт/(м2∙К).

Для трубных пучков в паровом объёме испобьзуются формулы для кипения и конденсации, аналогичные (1.52) и (1.54).

**5.9 Теплообмен с ТЭНами**

Тепловой поток, поступающий в объём жидкости и объём пара бака от ТЭНов, находится по формулам:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.61) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.62) |

где – усреднённый по поверхности ТЭНа коэффициент теплоотдачи;

– площадь поверхности теплообмена ТЭНа;

– доля поверхности ТЭНа, расположенная под уровнем жидкости;

– усреднённая температура ТЭНа.

Более подробно способ вычисления этих величин приведён в описании модели ТЭН.

**5.10 Учёт неравновесных процессов**

При численном решении задачи возможны ситуации, когда на данном временном шаге полученное значение энтальпии пара или полученное значение энтальпии воды

Рассмотрим общий случай, когда выполняются оба эти условия.

Расход объёмного испарения воды и объёмной конденсации пара можно определять простым способом, и более точным, согласованным со всей системой уравнений для бака. Опишем оба способа.

**5.10.1 Упрощённый способ**

Для того, чтобы паровой объём пришёл в равновесное состояние при должна возникнуть объёмная конденсация пара , величина которой находится из выражения

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.63) |

Аналогично, для того, чтобы водяной объём находился в равновесном состоянии, должна возникнуть объёмная генерация пара , величина которой находится из выражения

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.64) |

Из уравнений (1.63) и (1.64) можно выразить скорости объёмной конденсации и объёмной генерации пара:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.65) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.66) |

**5.10.2 Точный способ**

Для того, чтобы паровой объём пришёл в равновесное состояние при , должна возникнуть объёмная конденсация пара , величина которой должна быть такой, чтобы на данном временном шаге выполнялось условие:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.67) |

где – шаг интегрирования по времени.

Аналогично, для того, чтобы водяной объём находился в равновесном состоянии, должна возникнуть объёмная генерация пара , величина которой должна быть такой, чтобы выполнялось условие:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.68) |

Соответствующие изменения давления, энтальпии жидкости и энтальпии пара определяются появлением членов с и в правых частях уравнений (1.15), (1.23) и (1.26).

Изменение энтальпии жидкости за счёт объёмной генерации пара и охлаждения конденсата, поступающего в водяной объём из парового при объёмной конденсации пара, определяется выражением:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.69) |

где .

Из уравнения (1.23) получим изменение энтальпии пара за счёт объёмной конденсации пара:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.70) |

Изменение давления от дополнительной конденсации пара и объёмной генерации пара в водяном объёме получим из уравнения (1.26):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.71) |

где знаменатель равен:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.72) |

где множители и представляют собой множители B в разложении уравнения для производной энтальпии вида для жидкости и пара соответственно.

Подставив (1.70) и (1.71) в (1.67), а также (1.69) и (1.71) в (1.68) и обозначив X1=, X2=, получим следующую систему уравнений:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.73) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.74) |

где

;

;

.

Решая систему уравнений (1.73), (1.74) относительно , , получим

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.75) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.76) |

где

;

;

;

;

.

Если при решении задачи на данном временном шаге получено, что выполняется только условие , а пар остаётся насыщенным или перегретым, то , а из уравнения (1.76) при получается:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.77) |

Если при решении задачи на данном временном шаге получено, что , а вода остаётся насыщенной или недогретой, то , что соответствует из (1.76), и тогда из (1.75) получается:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.78) |

**5.11 Способ решения уравнений для пароводяного сосуда под давлением в теплогидравлическом коде SimInTech**

Уравнения записываются относительно следующих пяти дифференциальных переменных:

0 – давление в сосуде ;

1 – масса воды в 1-й области ;

2 – энтальпия воды в 1-й области ;

3 – энтальпия пара во 2-й области ;

4 – масса пара в объёме жидкости ;

По этим параметрам последовательно вычисляются:

1) объём 1-ой области по уравнению (1.16)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.79) |

2) объём 2-ой области

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.80) |

3) объёмное паросодержание в 1-ой области по уравнению (1.12)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.81) |

4) масса пара в паровом объёме

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.82) |

5) частные производные термодинамических параметров по давлению и энтальпии (по параметрам жидкости в первой области и ) , , , ;

6) частные производные термодинамических параметров по давлению и энтальпии (по параметрам паро во второй области и ) , ;

7) скорость объёмной генерации пара в первом объёме и скорость объёмной конденсации пара во втором объёме по уравнениям (1.75) и (1.76).

8) вычисляются расходы и энергии, поступающие в сосуд из подключённых к нему патрубков;

9) вычисляется выход пара во 2 объём и скорость конденсации пара в 1 объёме по уравнениям (1.28) – (1.41);

10) вычисляется скорость конденсации пара на зеркале и тепловой поток на поверхности раздела фаз по уравнениям (1.42), (1.43);

11) вычисляется тепловой поток от сосуда к стенке и интенсивность конденсации пара на стенке по уравнениям (1.46) – (1.55);

12) вычисляется тепловой поток от ТЭН-ов и теплообменников, поступающий в водяной и паровой объёмы;

13) производная массы пара во 2-ом объёме по уравнению (1.4)

14) производная массы жидкости в 1-ом объёме по уравнению (1.1)

15) производная массы пара в 1-ом объёме по уравнению (1.2)

16) уравнение для энтальпии жидкости в 1-ом объёме (1.15) записано в виде Если сравнить это уравнение с (1.15), то можно записать следующие выражения для коэффициентов A и B:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.83) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.84) |

Вычисляются записанные в таком виде коэффициенты.

17) аналогично вычисляются коэффициенты A и B в уравнении для энтальпии пара во 2-ом объёме. Из уравнения (1.21) получим

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.85) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.86) |

18) вычисляется производная давления в сосуде по уравнению (1.26) (с учётом подстановки производных энтальпий в виде и после выполнения некоторых преобразований):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.87) |

19) затем после вычисления производной находятся производные и

20) вычисления производная объёма 1-ой области по времени по уравнению (1.17)

21) вычисляется производная объёмного паросодержания в 1-ой области по уравнению (1.19)

Составленная таким образом система обыкновенных дифференциальных уравнений решается методом «Адаптивный 2» SimInTech.