Блок теплогидравлики «Пароводяной компенсатор давления» описывает нестационарные теплогидравлические процессы в замкнутом сосуде с наличием парового объёма над уровнем жидкости. 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 может находиться нагреватель или любая другая теплопроводящая конструкция (например, трубный пучок теплообменника);

- 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 и на стенке корпуса сосуда.

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 нагревателя, 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.

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

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

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

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

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

Уравнение сохранения 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), 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 отвечает за работу сил сжатия.

**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) |

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

**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) |

Отметим, 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 этого перепишем (1.10) в виде

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

После всех преобразований получим уравнение для первого расчётного объёма

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

Запишем уравнение для объёма теплоносителя 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 преобразование 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) |

Получаем для производной 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 подключенных 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).

В общем случае:

hpi

hs

α



h

где  - доля сечения, занятая паром;

- площадь проходного сечения трубы;

 - радиус трубы.

 ;

Рисунок 2

.

**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;

, - 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).

**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 мы добавили ограничение, что , 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) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (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.

**Теплообмен в паровом объёме**

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

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

где коэффициент теплообмена принят равным .

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.

**Теплообмен с теплопроводящими конструкциями**

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.

Коэффициент теплообмена определяется зависимостями для свободно-конвективных течений. При режим турбулентной свободной конвекции описывается зависимостью Байлея

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

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

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 можно использовать 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  можно определить по формуле

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

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

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

В водяном объёме может находиться нагреватель с заданной мощностью тепловыделения - , или теплопроводящая конструкция (TК), представляющая собой трубный пучок теплообменника, погружённого в объём жидкости.

**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.

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

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

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

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

Из уравнений (1.56) и (1.57) можно выразить скорости объёмной конденсации и объёмной генерации пара:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.58) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.59) |

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

Уравнения записываются относительно следующих семи 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 ;

5 – масса пара, появившегося вследствие объёмной генерации в объёме жидкости ;

6 – масса воды, появившейся вследствие объёмной конденсации в паровом объёме .

По этим параметрам последовательно вычисляются:

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

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

2) масса пара в 1-ой области:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.60) |

3) объём 2-ой области

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

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.12) |

5) масса пара в паровом объёме

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

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

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

8) скорость объёмной генерации пара в первом объёме по уравнению вида (1.59)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.59) |

9) скорость объёмной конденсации пара во втором объёме по уравнению вида (1.58)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.58) |

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

18) 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:

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

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

Записанные именнов в таком виде коэффициенты и вычисляются;

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

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

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

20) вычисляется производная давления в сосуде по уравнению (1.26) (с учётом подстановки производных энтальпий в виде )

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

21) затем после вычисления производной находятся производные и

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

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

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

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