|  |  |
| --- | --- |
|  | **HS – Канал** |
| в палитре |  |
|  |  |
| на схеме |  |

Блок реализует модель трубопровода, не имеющего внешней стенки. Концептуально представляет собой набор последовательно-соединенных элементарных гидравлических объемов (ячеек), расположенных друг за другом, имеющих некоторую длину и в поперечном сечении повторяющих сечение канала. Для обеспечения моделирования, блок должен быть включен в состав схемы, то есть иметь граничные условия, задаваемые блоками граничных условиями, внутренними узлами, трубами либо другими каналами. Принципиальным отличием канала от трубы является отсутствие теплообмена с окружающей средой через стенку трубы. Моделировать реальный трубопровод исключительно с помощью канала, можно в тех случаях, когда вклад теплообмена со внешней средой невелик либо им пренебрегают. Для других случаев можно использовать связку канал-стенка (см. ниже). Каждый элементарный объем является камерой идеального смешения, то есть величины параметров, характеризующие состояние рабочего тела в нем, не имеют пространственного распределения внутри объема и характеризуются только одним значением.

Данная концепция обеспечивает высокую скорость динамического расчета, однако накладывает некоторые ограничения на область применимости модели: невозможно в явном виде оценивать и моделировать поперечный переток теплоносителя внутри ячейки, а также завихрения и частичный противоток внутри одного сечения.

Во время расчета, на каждом такте математического решателя, происходит вычисление параметров внутри каждого объема, а также решаются балансовые уравнения, позволяющие моделировать перетекание рабочего тела из одного элементарного объема в другой. Таким образом определяются параметры гидравлической схемы, характеризующие состояние рабочего тела **внутри элементарного объема** (давление, температура, концентрация и т.д.), а также ряд параметров, связанных с переносом вещества **между двумя соседними элементарными объемами** (расход, скорость течения, потери давления и т.д.).

Такой способ моделирования позволяет получать распределенные значения параметров рабочего тела в масштабах всего трубопровода (всей гидравлической схемы). Условный канал, разбитый на 3 элементарных объема, позволяет контролировать параметры в 3 точках вдоль его длины. Это относится к тем параметрам, которые рассчитываются внутри каждой элементарной ячейки (давление, температура, концентрация и т.д.). Количество же тех, которые относятся к границам объемов (расход, скорость течения, потери давления и т.д.) будет равно количеству этих границ по длине канала. Причем для внешних границ крайних ячеек также происходит расчет. Таким образом, если канал содержит N элементарных объемов, то набор параметров, рассчитываемых для границ ячеек, будет состоять из N+1 элементов. Например, канал из трех ячеек будет иметь массив давлений из трех элементов (давление в каждом элементарном объеме), а массив расходов – из четырех (на каждой границе между ячейками).



В общем случае, значения параметров на границах между ячейками, образующими канал, рассчитываются автоматически, исходя из физической модели канала. Однако в значения некоторых из них можно вносить изменения с помощью соответствующих блоков библиотеки HS. Такие блоки устанавливаются на канал и имеют привязку к определенной границе между двумя элементарными ячейками. Технически, работа таких блоков заключается в формировании некоторой заданной добавки к определенному параметру. Например, блоки «НS – Клапан» и «HS – Местное сопротивление» вносят изменение в величину гидравлического сопротивления, рассчитанного на соответствующей границе. А блок «HS - Насос» вносит добавку в перепад давления на заданной границе. Такие принудительные изменения в результатах рассчитанных параметрах, учитываются решателем и уже на следующем такте расчета физично изменяются и другие параметры модели.

Кроме связи друг с другом, гидравлические ячейки, образующие канал, могут осуществлять **теплообмен с моделью стенки**, при помощи, устанавливаемых пользователем, тепловых связей. Таким образом можно моделировать не только гидравлический канал, но и трубу, которая осуществляет теплообмен с окружающей средой. В этом случае дополнительно решается уравнение теплопереноса между ячейкой канала и соответствующей ей ячейкой стенки. Следствием этого является то, что сетка разбиения стенки по длине, должна обязательно соответствовать сетке разбиения соответствующего ей канала. То есть стенка должна иметь ту же длину и то же количество элементарных участков по длине, что и родительский канал. Для случаев, когда канал имеет стенки с разными свойствами (например, наличие теплоизоляции на некоторой части трубы), существует возможность склеивания каналов. То есть реальный подобный трубопровод моделируется несколькими блоками «HS – Канал», соединенными последовательно и напрямую. С точки зрения математического расчета, все соединенные таким образом каналы будут обрабатываться, как один. Однако каждый такой канал может иметь уникальную стенку или не иметь ее вовсе.

Блок является одним из базовых для построения расчетных (нодализационных) схем теплогидравлических моделей. При помощи данного блока возможно моделирование достаточно произвольного контура с жидкостью (например, трубопровода, межтрубного пространства теплообменника и т. д.).

**Свойства блока «HS - Канал»**

|  |  |
| --- | --- |
| * Количество тепловых связей | Nheatport |
| * Количество расчетных элементов | N |
| * Гидравлический диаметр, м | Dg |
| * Проходное сечение, м² | S |
| * Длины элементов разбиения, м | L |
| * Приращение высоты, м | Dz |
| * Прямое местное сопротивление | KsiDir |
| * Обратное местное сопротивление | KsiInv |
| * Абсолютная шероховатость, м | Sh |
| * Коэффициент интенсификации теплообмена | kAlfa |
| * Объемное энерговыделение, Вт/м³ | qv |
| * Тип геометрии | geom\_type |
| * Относительный шаг труб в пучке (>=1) | x-rel |
| * Диаметр труб в пучке, м | d\_rod |
| * Количество труб в пучке | N\_rod |
| * Шаг навивки дист. проволоки, м | T\_wire |
| * Диаметр дист. проволоки, м | d\_wire |
| * Начальное давление, Па | P0 |
| * Начальная энтальпия, Дж/кг | H0 |
| * Начальный расход, кг/с | G0 |
| * Начальная температура стенки, °С | Twall\_0 |
| * Характеристика жёсткости стенок канала dS/dP, м²/Па | dSdP |
| * Входная связь для поперечного перетока | isCrossFlowIn |
| * Выходная связь для поперечного перетока | isCrossFlowOut |

**Параметры блока «HS-Канал»**

|  |  |
| --- | --- |
| * Давление, Па | \_p |
| * Энтальпия, Дж/кг | \_h |
| * Температура, °С | \_t |
| * Удельный объем, м³/кг | \_v |
| * Плотность, кг/м³ | \_rho |
| * Массовый расход, кг/с | \_g |
| * Объемный расход, м³/с | \_q |
| * Скорость, м/с | \_w |
| * Коэффициент распределенного трения | \_ksiTr |
| * Коэффициент местного трения | \_ksiM |
| * Потери на трение, Па | \_dPtr |
| * Нивелирные потери, Па | \_dPniv |
| * Потери на ускорение, Па | \_dPcon |
| * Напор насоса, Па | \_dPnas |
| * Мощность на стенке, Вт | \_qf |
| * Давление на входе, Па | \_pin |
| * Энтальпия на входе, Дж/кг | \_hin |
| * Температура на входе, °С | \_tin |
| * Массовый расход на входе, кг/с | \_gin |
| * Объемный расход на входе, м³/с | \_qin |
| * Скорость на входе, м/с | \_win |
| * Давление на выходе, Па | \_pou |
| * Энтальпия на выходе, Дж/кг | \_hou |
| * Температура на выходе, °С | \_tou |
| * Массовый расход на выходе, кг/с | \_gou |
| * Объемный расход на выходе, м³/с | \_qou |
| * Скорость на выходе, м/с | \_wou |
| * Перепад давления, Па | \_dp |
| * Перепад энтальпии, Дж/кг | \_dh |
| * Перепад температуры, °С | \_dt |
| * Суммарные потери на трение, Па | \_\_dPtrSum |
| * Суммарные потери на трение в ребре, которому принадлежит канал, Па | \_dPtrSumRebro |
| * Суммарные нивелирные потери, Па | \_dPnivSum |
| * Суммарные потери на ускорение, Па | \_dPconSum |
| * Суммарный напор насоса, Па | \_dPnasSum |
| * Суммарная мощность через стенку, Вт | \_qfSum |
| * Коэффициент теплоотдачи, Вт/( | \_Alfa |
| * Удельная энтальпия (массовое паросодержание) | \_X |
| * Режим теплообмена | \_alfamode |
| * Температура, усредненная по массе, °С | \_t\_coolant\_middle\_m |
| * Масса теплоносителя в ячейках | \_m1 |
| * Масса теплоносителя в ячейках (по ур-нию сохранения массы), кг | \_m2 |
| * Масса теплоносителя в ячейках (по ур-нию состояния), кг | \_lm |
| * Дисбаланс массы в ячейках, кг | \_h1 |
| * Энтальпия теплоносителя в ячейках (по ур-нию сохранения энергии), Дж | \_h2 |
| * Дисбаланс энтальпии в ячейках, Дж | \_lh |
| * Концентрация пассивных примесей, кг/кг | \_c\_passive\_tracer |

Блок может быть соединен с другими блоками посредством гидравлических и тепловых связей.

При помощи гидравлических связей блок может соединяться со следующими блоками:

* «HS – Канал»;
* «HS - Труба»;
* «HS – Граничный узел»;
* «HS – Внутренний узел»;
* «HS – Узел компенсатора»;
* «HS – Насос с электроприводом в сборе»;
* «HS – Эжектор»;
* «HS - Ссылка на объект»;
* «HS – Порт входа»;
* «HS – Порт выхода»;
* «HS – В память»;
* «HS – Из памяти».

При помощи тепловых связей блок может соединяться со следующими блоками:

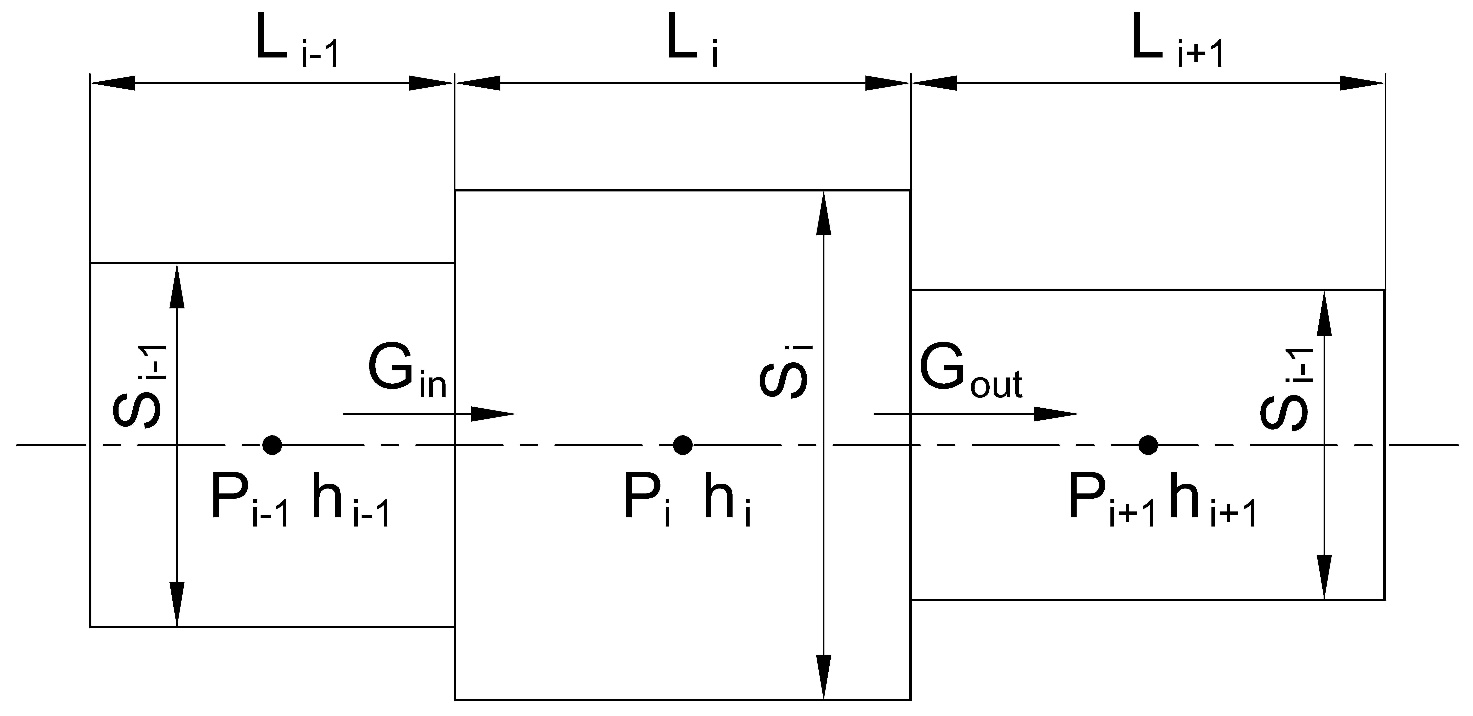
* «HS – Граничное условие 3-го рода»;
* «HS – Заданный тепловой поток на стенке»;
* «HS – Стенка с заданной температурой»;
* «HS – Тепловое граничное условие»;
* «HS – Цилиндрическая толстая стенка»;
* «HS – Цилиндрическая толстая стенка с излучением»;
* «HS – Двухслойная цилиндрическая толстая стенка»;
* «HS – Плоская толстая стенка»;
* «HS – Тонкая стенка Тип 1»;
* «HS – Тонкая стенка Тип 2»;
* «HS – Зазор между стенками».

В качестве дополнительных элементов на блок «HS - Канал» могут быть установлены следующие блоки (при этом блок «HS – Канал» будет родительским, а дополнительно установленные блоки – дочерними):

* «HS – Местное сопротивление»;
* «HS – Простой насос»;
* «HS – Насос»;
* «HS – Заданный напор насоса»;
* «HS – Плунжерный насос»;
* «HS – ТЭН».

**Физическая модель, реализованная в блоке «Канал»**

Канал является одним из базовых объектов теплогидравлического кода. Он представляет собой набор произвольного количества связанных между собой контрольных объёмов (**Рисунок 1**). Для контрольных объёмов решаются уравнения сохранения массы и энергии жидкости, а для связывающих контрольные объёмы гидравлических связей – уравнения сохранения импульса.



**Рисунок 1** - Канал

В теплогидравлическом коде рассматривается смещённая сетка. При этом скалярные характеристики теплоносителя (давление, энтальпия, концентрации пассивных примесей) находятся в центрах контрольных объёмов, а векторные характеристики теплоносителя (скорости, расходы) – на границах контрольных объёмов (в гидравлических связях).

Предполагается, что значения скалярных характеристик теплоносителя остаются постоянными в пределах контрольного объёма, и меняются скачком на границе ячеек, а значения векторных характеристик теплоносителя остаются постоянными в пределах левого и правого полуобъёмов, примыкающих к гидравлической связи, и меняются скачком в центрах ячеек. Запишем в общем виде, что значение скалярной величины на границе ячеек зависит от значений в соседних ячейках следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

где – значение величины на j-й границе;

– значение величины в (j-1)-ой расчётной ячейке (слева от j-й ГС);

– значение величины в j-ой расчётной ячейке (справа от j-й ГС);

– весовой множитель.

В случае реализации схемы аппроксимации конвективных членов «против потока» весовой множитель рассчитывается следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

но в общем случае это можно делать и по-другому.

Приведём основные уравнения сохранения, решаемые в теплогидравлическом коде.

**Уравнение сохранения массы**

Одномерное уравнение сохранения массы для канала с переменным поперечным сечением имеет вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

где – плотность жидкости;

– скорость жидкости;

– площадь проходного сечения канала;

– время;

– пространственная координата.

Заменяя скорость на массовый расход, а производную плотности по времени расписывая через частные производные плотности по давлению и по энтальпии, приходим к следующему виду уравнения (3):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

где – давление жидкости;

– удельная энтальпия жидкости;

– массовый расход жидкости;

– частная производная плотности жидкости по давлению при постоянной энтальпии;

– частная производная плотности жидкости по энтальпии при постоянном давлении.

В результате интегрирования уравнения (4) по длине контрольного объёма получаем уравнение сохранения массы в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

где – объём расчётной ячейки;

– массовый расход жидкости в левой гидравлической связи;

– массовый расход жидкости в правой гидравлической связи;

– приведённая характеристика жёсткости стенок канала – частная производная площади поперечного сечения по давлению жидкости.

**Уравнение сохранения импульса**

Общее уравнение движения жидкой среды в одномерном приближении при учёте в составе массовых сил только силы тяжести имеет вид

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

где – ускорение свободного падения;

– угол между осью канала и направлением вектора силы тяжести;

– коэффициент трения на стенке канала;

– источник импульса.

Интегрируя уравнение (6) в пределах левого и правого полуобъёмов, примыкающих к рассматриваемой гидравлической связи, получим уравнение сохранения импульса в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

где

– инерционный коэффициент гидравлической связи;

– длина расчётной ячейки;

– коэффициент, при помощи которого аппроксимируется значение расхода в центре j-й расчётной ячейки;

– коэффициент, при помощи которого аппроксимируется площадь проходного сечения в j-й гидравлической связи.

**Уравнение сохранения энергии**

Исходное дифференциальное уравнение сохранения энергии для элементарного объёма имеет вид

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

где – удельная внутренняя энергия

– мощность объёмных источников энерговыделения;

– массовая сила;

– вектор плотности теплового потока, выходящего из рассматриваемого объёма.

Переходя от удельной внутренней энергии к удельной энтальпии, подставляя массовые силы, выраженные из уравнения сохранения импульса, переходя от скоростей к массовому расходу, заменяя производную плотности по времени согласно уравнению сохранения массы и представляя тепловой поток в виде продольной и поперечной составляющих, получим уравнение сохранения энергии в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

Интегрируя уравнение (9) по длине контрольного объёма, получаем уравнение сохранения энергии в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

где – объёмное энерговыделение;

– осевой тепловой поток;

– тепловой поток на стенке канала.

**Уравнение сохранения массы пассивной примеси**

Исходное дифференциальное уравнение для концентрации пассивной примеси в канале переменного поперечного сечения имеет вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

где – концентрация пассивной примеси (масса пассивной примеси на единицу массы жидкости).

Раскрывая производные и подставляя вместо производной плотности по времени её выражение из уравнения сохранения массы, а также добавляя отрицательный источник экспоненциального распада пассивной примеси и произвольный объёмный источник, получим уравнение сохранения массы пассивной примеси в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

где – постоянная распада примеси;

– объёмный источник примеси.

Интегрируя (12) по длине контрольного объёма, получаем следующее уравнение сохранения массы примеси:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

Полученные аналоги уравнений сохранения переписываются через приращения неизвестных величина на текущем слое по времени (при этом производные неизвестных величин по времени заменяются через приращения с использование формулы дифференцирования назад) и решаются итерационным методом Ньютона-Рафсона. При этом используется идея разделения по физическим процессам, в соответствии с которой первоначально определяются поля давлений и расходов в контуре, затем поле энтальпий, и, наконец, поле концентраций пассивных примесей.

Свойство «**Тип геометрии**» является выпадающим списком, с помощью которого пользователь может определить тип геометрии трубы, наиболее подходящий для моделирования. Пользователю доступны следующие типы:

* «Круглая труба»
* «Пучок труб с треугольной упаковкой»
* «Пучок труб с квадратной упаковкой»
* «Пучок труб с треуг. упаковкой с дист. «проволока по оболочке»»
* «Пучок труб с треуг. упаковкой с дист. «проволока по проволоке»»
* «Пучок труб с квадр. упаковкой с дист. «проволока по оболочке»»
* «Пучок труб с квадр. упаковкой с дист. «проволока по проволоке»»
* «Периферийный ряд твэлов»
* «Плоская щель»
* «Поперечное обтекание гориз. пучка труб с шахматной упаковкой»