

А.В. ТроценкоОдесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082
e-mail: trotalex@rambler.ru**ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПОНЯТИЯ УЗЛОВОЙ ТОЧКИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Предложено обобщённое определение понятия узловой точки схемы энергетической установки. Выполнена классификация типов узловой точки в зависимости от видов энергетических потоков. Составлен унифицированный список атрибутов для любого типа узловых точек. Рассмотрены конкретные программные представления атрибутов для разных типов узловых точек. Сформулированы основные положения, лежащие в основе предлагаемой концепции узловой точки.

Ключевые слова: Термодинамическая система. Узловая точка. Формализация.

A.V. Trotsenko**FORMALIZATION OF NODAL POINT CONCEPTION FOR THERMODYNAMIC SYSTEM**

The generalized formulation of nodal point conception for energetic plant scheme is suggested. The classification of nodal point types related with kinds of energy flows is done. The unified record of attributes for any nodal point types is made out. Concrete computer notions for attributes of all nodal point types are considered. Basic statements of suggested nodal point conception are formulated.

Keywords: Thermodynamic system. Nodal point. Formalization.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень вычислительной техники даёт возможность рассматривать такие задачи термодинамического расчёта и анализа низкотемпературных систем, которые раньше не решались. В связи с этим становится актуальной проблема разработки и пересмотра ряда положений и методов, связанных напрямую с этими задачами.

Используемые ныне в термодинамических расчётах интуитивно определённые понятия являются одним из главных препятствий для создания универсальных систем автоматизированного проектирования (САПР) установок холодильной и криогенной техники. Одна из реализуемых такими САПР целей — организация системного моделирования и анализа указанных установок. Для этого необходима компьютерно ориентированная формализация их структур.

Формализация как особый подход к научному познанию, использующий специальную символику для компьютерного моделирования, заключается, прежде всего, в отображении результатов мышления в определениях и утверждениях, не допускающих неоднозначного толкования и подлежащих алгоритмизации. Причём данная формализация должна касаться всех этапов триады «модель-алгоритм-программа».

При создании термодинамической модели установки возникают трудности, связанные с расстановкой на ней узловых точек и, как следствие, заданием

её схемы. Во многом они обусловлены отсутствием формализованного подхода к определению такого базового понятия схемы как узловая точка. Без него невозможно осуществить формализацию следующих этапов разработки термодинамической модели структуры. В данной работе предложен подход к рассмотрению понятия узловой точки, учитывающий её роль при термодинамическом расчёте и анализе схемы.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УЗЛОВОЙ ТОЧКИ

В литературе отсутствует общепринятое определение узловой точки схемы. Нами предлагается для неё следующая формулировка, основанная на анализе существующих структурных представлений схем низкотемпературных установок:

«Узловой называется именованная точка, характеризующая термодинамическое состояние рабочего тела в сечении трубопровода». (1)

Термодинамическое состояние вещества характеризуется набором термодинамических функций, необходимых для решения поставленной задачи.

В данной формулировке в перечень характеристик, определяемых узловой точкой, не включён расход рабочего тела, так как существующий способ её позиционирования не даёт возможность однозначного ус-

тановления расхода в местах смешения или разделения материальных потоков. Это обстоятельство препятствует её формализации.

В работе [1] узловой названа точка схемы, которая характеризует начало или конец процесса в элементе системы. Это определение позволяет ввести в число её характеристик расход рабочего тела, но по-прежнему ограничивается учётом только материальных потоков.

Основное назначение узловой точки состоит в её использовании для расчётов процессов в элементах установки, а также для составления материальных, энергетических и эксергетических балансов. Кроме того, её применяют также для задания некоторых исходных значений термодинамических функций.

В низкотемпературных системах, реализующих термомеханическое охлаждение, присутствуют энергетические потоки в форме тепла Q , работы L и энергии потока массы I , где I — полная энтальпия рабочего тела. В приведённой формулировке (1) узловой точки отражена лишь энергия I , что не даёт возможности формализовать процедуры составления энергетических и эксергетических балансов.

Учитывая отмеченные препятствия для формализации узловой точки, целесообразно определить её несколько по-другому:

«Узловой называется именованная точка элемента, характеризующая состояние энергетического потока, входящего в элемент рассматриваемой системы или выходящего из него». (2)

В отличие от определения (1) формулировка (2) предполагает, что узловая точка является «собственностью» элемента установки. Это несколько усложняет структуру установки и задание её схемы. Например, традиционный фрагмент системы на рис. 1,а должен быть заменён фрагментом, представленным на рис. 1,б. Как видно из этого, такая замена приводит к увеличению числа узловых точек и появлению дополнительного элемента — смесителя МХ. Подобная ситуация возникает и при разделении материальных потоков. Но эти усложнения являются оправданными ввиду необходимости однозначного определения всех её атрибутов.

Отрезок трубопровода, в принципе, также должен рассматриваться как элемент схемы, назначение которого — в передаче материального

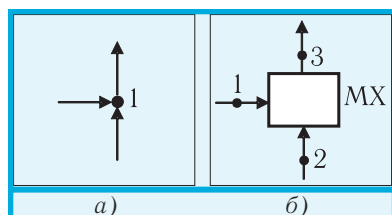


Рис. 1. Схемы смешения материальных потоков при различных определениях узловой точки: а — согласно формулировке (1); б — в соответствии с (2)

потока от одного элемента к другому. При задании единственной узловой точки в соответствии с определением (1) неявно предполагалось, что термодинамические функции рабочего тела на вхо-

де в участок трубопровода и выходе из него были одинаковы. Это соответствует адиабатному течению вещества в трубопроводе без гидравлического сопротивления. Если принять эти допущения для определения базовой

точки согласно (2), то участки трубопровода тоже можно исключить из рассмотрения при задании схемы. Это объясняется тем, что они не влияют ни на энергетический, ни на эксергетический балансы.

В то же время имеются случаи, когда необходимо учитывать особенности процесса рабочего тела в трубопроводе. К ним относится, например, нагрев вещества за счёт тепла окружающей среды на выходе обратного потока криогенной установки из теплообменника, т.е. учёт недорекуперации. Отличия в представлении фрагментов схем, соответствующих этому примеру, при разных определениях узловых точек характеризуются рис. 2.

Рис. 2,а, как можно заметить, противоречит общепринятой концепции о неизменности термодинамических свойств рабочего тела на участке трубопровода. Рис. 2,б, наоборот, подтверждает эту концепцию, но для этого вместо участка трубопровода, на котором увеличивается температура агента, в схему вводятся такие дополнительные элементы, как подогреватель НТ и узловая точка 3, характеризующие теплоту, подводимую из окружающей среды.

Концепция, соответствующая формулировке (2), предполагает, что каждый энергетический поток должен быть помечен узловой точкой. Но поскольку, как отмечено ранее, в низкотемпературной установке имеются потоки различных видов энергии, отличающихся своими характеристиками, то целесообразно ввести в рассмотрение разные типы узловых точек. Наиболее рационально, имея в виду термодинамический расчёт схем, классифицировать эти типы по видам энергетических потоков, соответствующих узловой точке. На рис. 3 изображена предлагаемая структура для классификации узловых точек низкотемпературных систем.

Согласно данной классификации имеются следующие типы точек: М-точка, характеризующая состояние потока вещества; Е-точка, характеризующая виды энергии отличные от энергии, переносимой массой рабочего тела.

Обозначения UT и US (см. рис. 3) определяют, со-

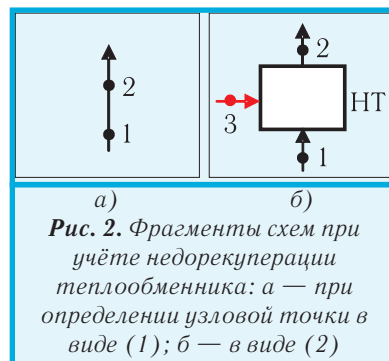


Рис. 2. Фрагменты схем при учёте недорекуперации теплообменника: а — при определении узловой точки в виде (1); б — в виде (2)

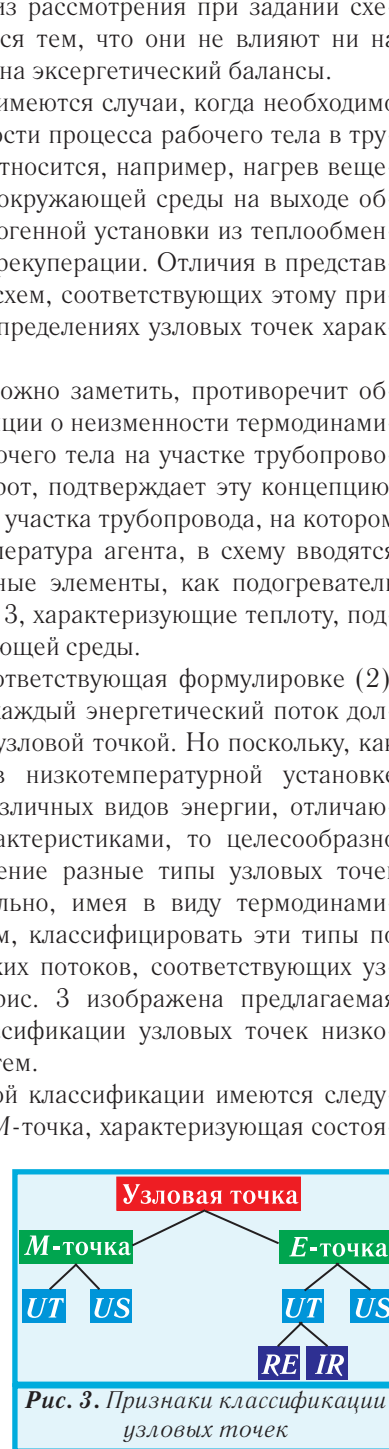


Рис. 3. Признаки классификации узловых точек

ответственно, полезность и бесполезность рассматриваемого энергетического потока. Данные признаки не подлежат формализации, а устанавливаются оперирующей стороной на этапе проектирования установки. Они необходимы для составления эксергетических балансов установки и её подсистем.

Символом RE на рис. 3 выделен полезный поток энергии, полностью превратимый в другие её виды. К такому относится, например, механическая работа. Соответственно, через IR обозначен полезный вид энергии, частично превратимый в другие её виды, например, тепло. Эти признаки также используются в процедуре составления эксергетических балансов при выборе расчётных соотношений для эксергии. Они легко поддаются формализации, если применять для каждого вида энергии уникальное обозначение. Для M -точки данные признаки излишни, так как энергия потока массы не может полностью переходить в другие её виды.

Приведённая на рис. 3 структура и признаки узловой точки в определённой мере формируют её атрибуты.

3. АТРИБУТЫ УЗЛОВОЙ ТОЧКИ

Узловая точка любого типа может быть формально представлена подобно структуре процедуры расчёта, используемой в алгоритмических языках, в виде:

$$\langle \text{ИмяТочки} (\text{Список атрибутов}) \rangle. \quad (3)$$

Правила образования имён точек не являются строгими. Например, их традиционно можно было бы идентифицировать натуральным рядом чисел. Но при этом появляются дополнительные процедуры, задающие её тип и принадлежность к определённому элементу. По этой причине целесообразно, чтобы *ИмяТочки* содержало её тип, номер и указывало на элемент, к которому она относится. Тип точки устанавливается символами M или E , её номер — натуральным числом, под которое отводится две позиции. При данном подходе обозначения элементов должны быть унифицированы. Примерами кодировки имён точек, представленных на рис. 2,б, могут быть $M01HT$ (01 -я M -точка в элементе HT) и $E03HT$ (03 -я E -точка в элементе HT).

В случае предлагаемого способа формирования имени узловой точки возможно создание отдельной визуальной программы. Её задача заключается в установлении конкретного имени для элемента и по представленному изображению этого элемента с заранее пронумерованными точками создания их имён и передачи информации в программу, задающую схему установки. Для отдельных элементов (ректификационная колонна, смеситель и др.) желательно создание образа с избыточным числом узловых точек. Поэтому программа должна предусматривать возможность исключения из рассмотрения лишних точек и перенумерации оставшихся.

Разработка списка атрибутов узловой точки предполагает выделение числа этих атрибутов, установление порядка их расположения в списке, а также зада-

ние типов переменных, идентифицирующих атрибуты. При этом целесообразно ограничиться минимальным списком с числом его элементов и их смыслом, не зависящим от типа точки. Однако конкретное содержание отдельного атрибута и выбор типа задающей его переменной будут определяться типом узловой точки.

В данной работе предлагается следующая последовательность для формирования понятия «Список атрибутов»:

$$(P, C, F, E, D). \quad (4)$$

Атрибут P является единственным членом списка (4), содержание которого не зависит от типа узловой точки. Он отражает её расположение относительно своего элемента и представляется функцией вида:

$$P = \begin{cases} +1, & \text{если точка определяет вход потока в элемент;} \\ 0, & \text{если точка не принадлежит элементу} \\ & \text{или исключается из рассмотрения;} \\ -1, & \text{если точка определяет выход потока из элемента.} \end{cases}$$

В принципе, атрибут P может отсутствовать в определении узловой точки, если связать её положение (вход или выход) с фиксированным номером точки. Однако такой подход усложнит как процедуру поиска положения точки, так и алгоритм составления балансовых соотношений. Задание атрибута P в виде такой числовой функции удобно тем, что её значения могут быть непосредственно использованы в уравнениях балансов.

Остальные переменные из списка (4) имеют следующий общий смысл: C — род энергетического потока; F — набор характеристик этого потока; E — набор данных для расчёта эксергии потока; D — атрибут, характеризующий степень определённости узловой точки. При обращении к программной процедуре целесообразно формализовать правило составления фактических имён атрибутов, составляя их из имени в списке (4) и имён узловых точек. Для функции P из приведённого на рис. 1,б примера кодировки узловой точки как $M03MX$ имя простой переменной будет « $PM03MX$ ».

Как отмечалось выше, конкретные содержания этих переменных зависят от типа узловой точки. Рассмотрим их для M -точки.

Атрибут M -точки, названный C , в общем случае характеризует род компонентов рабочего тела и их доли в смеси. Характеристики, составляющие данный атрибут, являются обязательными для расчёта термодинамических функций в узловых точках. Способы кодировки имён чистых веществ и проблемы, связанные с ними, изложены в работе [2]. Возникающие при этом трудности обусловлены следующими причинами:

- возможным использованием в системе нескольких видов рабочих тел, например, при наличии в цикле ступени предварительного охлаждения;
- возможным изменением валового состава из-за смешения или разделения потоков, например, в фазоразделителе цикла Климченко [3];

- необходимостью задавать в каждой точке число компонентов рабочего тела;
- необходимостью допускать существование в каждой точке фазового равновесия.

Ясно, что учитывать все эти причины в списке формальных параметров программной процедуры не рационально. Один из выходов из данной ситуации состоит в создании для узловой точки файла данных. Он содержит записи, полями которых являются имя компонента, его валовая доля, а также его доли в сосуществующих фазах. Число компонентов для каждой точки в этом случае равно числу строк в её файле. Альтернативный способ задания этого файла заключается в составлении записей для всех чистых веществ, используемых в установке. При этом в узловой точке доли отдельных веществ равны нулю, но число компонентов для каждой точки остается фиксированным и также определяется числом записей.

Для любого способа формирования файла атрибут C представляет собой текстовую переменную, отражающую его имя. Для приведённого выше примера именем файла будет «СМ03МХ».

F -атрибут M -точки содержит упорядоченную последовательность её параметров, основу которой составляет набор термодинамических свойств рабочего тела. Формализация этого набора предполагает унификацию расположения термодинамических свойств и задание их размерности. Вопросы данной унификации рассмотрены в работе [2]. В упорядоченную последовательность включается, по крайней мере, один параметр — расход, не относящийся к термодинамическим величинам. Поскольку все члены последовательности являются вещественными числами, то они могут быть объединены в массив F . Чтобы сделать его открытым для пополнения, целесообразно присвоить в нём индексы для термодинамических свойств, начиная с единицы в сторону увеличения. Для остальных параметров F -атрибута имеет смысл выбрать начальный индекс равным нулю и принять отрицательным его приращение. Для данного атрибута, в соответствии с предлагаемым правилом, имя массива будет «FM03МХ».

E -атрибут M -точки содержит заданное значение, определяющее полезность материального потока, и возможный результат расчёта в ней эксергии. В качестве примера, иллюстрирующего необходимость такого параметра узловой точки, могут служить отбросные потоки воздухоподогревательной установки. Полезность, в отличие от вариантов, представленных для наглядности схем на рис. 3, удобно определять единственной логической переменной U . Её истинному значению будет отвечать параметр UT , ложному — параметр US . Таким образом, E -атрибут формируется в виде записи, первым полем которой будет логическая переменная, а вторым — простое вещественное число.

Для расчёта значения эксергии материального потока следует знать параметры окружающей среды (давление и температуру), а также составляющие её компоненты и их доли. Эти величины, по аналогии с рассмотренным способом задания рода и состава рабочего тела, могут быть организованы в виде файла

данных. Этот файл не связан с конкретной M -точкой и обращение к нему осуществляется при необходимости вычисления величины эксергии, т.е. при истинном значении переменной U .

Для данного атрибута, в соответствии с предлагаемым правилом, имя записи для рассматриваемого примера будет иметь вид «EM03МХ».

D -атрибут выявляет признак определённости M -точки, т.е. устанавливает, насколько известны (заданы или рассчитаны) все её параметры. Определённость является важным свойством узловой точки для разработки формализованного алгоритма термодинамического расчёта схемы. С помощью D -атрибута осуществляется поиск точек и конкретных их F -атрибутов, которые могут быть вычислены на основании уравнения состояния или уравнений процессов в элементах схемы, а также уравнений материального и энергетического балансов. На его основе может быть осуществлен контроль за переопределённостью термодинамического состояния, т.е. в узловой точке известно больше термодинамических свойств, чем необходимо для термодинамически согласованного его определения. Он может быть также использован для контроля правильности ввода исходных данных.

Нахождение значений D -атрибута M -точки является, пожалуй, наименее формализованной и наиболее логически сложной среди аналогичных задач для других атрибутов узловой точки. В работе [1] предложено в соответствие каждому термодинамическому свойству и расходу ставить целочисленную переменную, выражающую его определённость. При этом в данной работе совсем упускается из виду процедура инициализации параметров точки, без которой практически невозможно установить факт присвоения переменной определённого значения. Наличие процедуры инициализации, по-видимому, позволит избежать использования дополнительных переменных для каждого параметра, но вызовет определённые трудности при её формализации. Инициализации подлежат все атрибуты и их параметры. Для логических и текстовых переменных трудностей с инициализацией не предвидится. Они возникают для некоторых термодинамических функций (внутренняя энергия, энтальпия), не имеющих фиксированных точек отсчёта. Возможное решение задачи определённости состоит в использовании признака неприсвоенного значения переменной из отладчика выполнения программы.

Значения D -атрибута целесообразно представить в виде массива логических переменных. Первый элемент массива соответствует атрибуту P ; второй — атрибуту C ; третий, четвертый — F ; пятый — атрибуту E ; шестой — атрибуту S . Выделение двух элементов для F -атрибута обусловлено необходимостью отдельного контроля определённости расхода и термодинамических свойств. Естественным является присвоение логической переменной атрибута истинного значения в случае его определённости. Для примера точки из рис. 1, б имя массива D -атрибута будет «DM03МХ».

Рассмотрим содержание всех атрибутов для E -точки. В качестве элемента, с помощью которого

будут иллюстрироваться предлагаемые далее положения и способы их программной реализации, выбран компрессор CP. Его формализованная схема изображена на рис. 4. На ней через M01, M02 обозначены M-точки; E01, E02 являются E-точками. Точка E01 характеризует подведённую к компрессору извне энергию, точка E02 определяет отведённое в окружающую среду тепло.

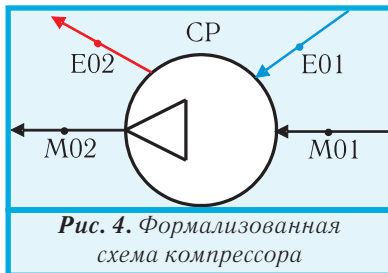


Рис. 4. Формализованная схема компрессора

P-атрибуты E-точек будут задаваться, как отмечено ранее, аналогично этим же атрибутам M-точек. Они для компрессора будут именоваться как «PE01CP» и «PE02CP».

Для потока энергии, не связанного с переносом массы рабочего тела, C-атрибут определяет способность полного его превращения в другие виды энергии. На основе значений этого атрибута будут формироваться параметры RE и IR, представленные на рис. 3. Возможные варианты задания типа переменной для него заключаются в использовании логической переменной или массива из двух символов. В последнем случае полностью превратимые виды энергии обозначаются символом L, что соответствует общепринятому обозначению механической работы. Род остальных видов энергии имеет смысл идентифицировать символом Q, принятым для кодировки теплового потока. Более простым и предпочтительным является представление значения C-атрибута логической переменной, когда указывается истинное значение для полностью превратимых видов энергии, а ложное — для остальных. Для схемы, изображённой на рис. 4, потоку E01 будет отвечать истинное значение C-атрибута, а потоку E02 — ложное. Имена C-атрибутов этих потоков будут иметь вид «CE01CP» и «CE02CP».

F-атрибут E-точек, представляющий собой численное значение энергетического потока, не требует особых комментариев. Он задаётся простой вещественной переменной и для рассматриваемых примеров именуется как «FE01CP» и «FE02CP».

E-атрибут E-точек должен отражать такие характеристики соответствующего энергетического потока, как полезность, а также, при её наличии, величину эксергии и ссылку на расчётное соотношение для эксергии, зависящее от рода потока. Дополнительной характеристикой по отношению к идентичным атрибутам M-точек является ссылка, которую можно организовать с помощью условного оператора обращением к той или иной подпрограмме. Поэтому структуры записей E-атрибута для обоих типов узловых точек

совпадают. Для рассматриваемых примеров данные атрибуты именуются как «EE01CP» и «EE02CP».

Не возникает проблем с формализацией D-атрибута E-точек. Он представляется простой логической переменной и для рассматриваемых примеров именуется как «DE01CP» и «DE02CP».

Кроме U-параметра E-атрибута и D-атрибута все остальные параметры, в принципе, в зависимости от постановки задачи и выбора её исходных данных могут быть как входными, так и выходными для подпрограмм.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная в данной работе формализация узловой точки основывается на следующих предлагаемых положениях:

1. Узловая точка предназначена для выполнения термодинамического расчёта и анализа структуры, входящей в схему установки.

2. Каждая узловая точка должна принадлежать конкретному элементу.

3. Каждый энергетический поток элемента установки должен быть представлен узловой точкой.

4. В зависимости от вида энергетического потока можно выделить два типа узловых точек.

5. Список формальных атрибутов узловой точки не зависит от её типа, но их конкретные представления определяются им.

6. Правила составления имен узловых точек должны быть унифицированы. Их имена должны содержать тип точки, её номер и имя элемента, которому она принадлежит.

7. Правила составления имён атрибутов узловых точек должны быть унифицированы. Их имена должны содержать формальное имя атрибута и имя конкретной узловой точки.

Представленная формализация, как и любая другая, содержит субъективные моменты, поэтому она может быть усовершенствована или изменена. Но формализации узловой точки необходимо уделить первоочередное внимание, если иметь в виду решение общей проблемы формализации схемы установки. Без неё невозможно приступить к решению следующей задачи указанной проблемы — формализации элемента установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бодюл С.В., Таран В.Н. Алгоритмизация расчётов циклов криогенных систем. Базовые понятия и принципы// Технические газы. — № 4. — 2006. — С. 12-18.

2. Троценко А.В., Валякина А.В. Формализация определения термодинамических свойств рабочих тел из единичных уравнений состояния// Технические газы. — № 4. — 2006. — С. 55-58.

3. Клименко А.П. Сжиженные углеводородные газы. — М.: Недра, 1974. — 368 с.