

**А.В. Троценко**

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082

e-mail: trotalex@rambler.ru

## ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ

*На основе формализованного подхода к определению элемента криогенной системы как множества узловых точек различного типа сформулированы задачи, возникающие при присваивании начальных значений атрибутам этих точек. Рассмотрены особенности и предложен способ инициализации набора термодинамических свойств рабочего тела. Изложены возможные способы решения этих задач для элемента-предка криогенных установок.*

**Ключевые слова:** Криогенная система. Узловая точка. Элемент системы. Формализация. Инициализация.

## INITIALIZATION OF CRYOGENIC SYSTEM'S ELEMENTS

**A.V. Trotsenko**

*Based on formalized approach to the definition of an element of cryogenic system as sets of different types nodal points, the problems arising at assignment of the initial values to attributes of these points are formulated. Features of initialization of working substance's thermodynamic properties are considered, and the method to carry out this initialization is offered. The possible methods to solve these problems for ancestor element of cryogenic systems are stated.*

**Keywords:** Cryogenic system. Nodal point. Element of the system. Formalization. Initialization.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития программирования даёт возможность исследовать актуальную проблему формализации термодинамического расчёта циклов криогенных энергетических установок. Её решение, в первую очередь, обуславливает необходимость пересмотра и уточнения некоторых базовых понятий, к которым, в частности, относится определение узловой точки и элемента системы.

В работе [1] предложена обобщенная формулировка узловой точки как характеристики энергетического потока между элементом системы и её окружением. Такая её дефиниция позволила построить иерархию возможных типов узловых точек для криогенных систем и выявить их атрибуты. Так как сам подход к формализации объекта предполагает его представление лишь по внешним признакам, не вникая в суть протекающих в нём процессов, то естественным было определить этот объект в виде множества узловых точек разного типа [2]. Анализ существующих элементов низкотемпературных установок по виду и количеству энергетических потоков, связанных с ними, позволил создать образ элемента-предка, необходимый для использования в рамках объектно-ориентированного программирования.

Одним из следующих шагов формализации элементов является инициализация характеристик эле-

мента-предка, которая заключается в задании начальных значений программных переменных, отражающих эти характеристики. На данном этапе необходимо решить следующие задачи:

- установить переменные, подлежащие инициализации;
- выявить конкретные начальные значения инициализируемых переменных;
- предложить способ установления признака того, что узловая точка элемента и он в целом определены, т.е. все их характеристики известны.

Инициализация элементов низкотемпературных установок имеет ряд особенностей, обусловленных качественно отличающимися атрибутами различных видов узловых точек [1].

Цель данной работы заключается в представлении возможного способа решения сформулированных выше задач применительно к элементам низкотемпературных установок.

### 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТА-ПРЕДКА

Формализованный подход к определению элементов энергетической системы предполагает их задание через количество и виды принадлежащих им узловых точек. Этот подход может быть реализован на основе предложенной и рассмотренной в работе [1] классификации типов узловых точек по виду характеризуе-

мых ими видов энергии. В соответствии с этой классификацией всё множество узловых точек делится на два подмножества:  $M$ -точки и  $E$ -точки.  $M$ -точка связана с энергией, переносимой материальным потоком.  $E$ -точки, в свою очередь, разбиваются на подмножества  $Q$ - и  $L$ -точек, которые соответственно характеризуют потоки энергии в форме тепла и работы.

Элемент можно считать инициализированным, если инициализированы все его узловые точки. Вне зависимости от конкретно рассматриваемого элемента установки первоначально должен быть инициализирован его предок. Предложенный в работе [2] образ элемента-предка изображён на рис. 1.

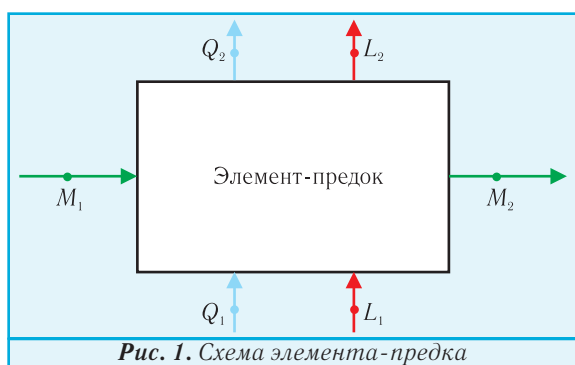


Рис. 1. Схема элемента-предка

На данном рисунке зелёным цветом выделены потоки массы рабочего тела, голубым — потоки энергии в форме тепла, красным — потоки энергии в форме работы. Соответственно, символами  $M$ ,  $Q$  и  $L$  обозначены узловые точки, связанные с потоками массы, тепла и работы.

Каждый вид узловой точки имеет только ему свойственные особенности своих атрибутов. По этой причине должны быть рассмотрены отдельно процедуры инициализации для  $M$ -,  $Q$ - и  $L$ -точек. Кроме того, программные переменные, описывающие атрибуты узловых точек имеют разные типы, что делает невозможным простое обнуление их начальных значений, часто применяемое в этой процедуре.

Инициализация элемента-предка предполагает присвоение ему собственного имени. В качестве варианта такого имени может быть рассмотрено обозначение ANEL (Ancestor element). При корректном задании начальных значений элемента ANEL отпадает необходимость в использовании отдельной переменной, характеризующей его определённую. Это обусловлено тем, что инициализацию всех переменных элемента-предка можно производить при создании класса элементов энергетических установок.

### 3. ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ УЗЛОВЫХ $M$ -ТОЧЕК

Под  $M$ -точкой понимается узловая точка, характеризующая перенос энергии массой рабочего тела. К её атрибутам, подлежащим инициализации, необходимо отнести:

- переменные, идентифицирующие рабочее тело;
- набор термодинамических функций рабочего

тела, используемый в конкретной задаче;

— данные, необходимые для проведения термодинамического анализа элемента.

— расход рабочего тела.

Переменными, идентифицирующими рабочее тело, являются имя (род) рабочего тела, число его компонентов, а также относительное содержание этих компонентов. Способы кодировки имен чистых веществ и проблемы, связанные с ними, изложены в работе [3]. Вне зависимости от выбранного способа предпочтительно задавать род компонента текстовой переменной. Поэтому и для элемента ANEL имеет смысл задавать вещество такого же типа переменной, значение которой не совпадает ни с одним из существующих и возможных имен чистых рабочих тел. Например, таким именем может быть слово 'unknown'. Число компонентов естественно задавать глобальной целочисленной переменной с начальным значением для элемента-предка, равным единице. Обнулению подлежат исходные значения относительного содержания компонентов в смеси, представленные массивом вещественных чисел. Однако при этом следует иметь в виду, что как в процессе термодинамического расчёта, так и при инициализации, в общем случае, необходимо учитывать возможность наличия парожидкостного равновесия смеси. По этой причине для описания многокомпонентного рабочего тела нужно использовать три массива составов, соответствующих его однофазному состоянию  $z$ , а также паровой  $y$  и жидкой  $x$  фазам. Ниже приведён фрагмент Паскаль-программы, в котором рассматривается вариант инициализации рабочего тела элемента ANEL:

```
Subs:='unknown',
{идентификация имени исходного вещества};
Nc:=1,
{задание исходного числа компонентов};
z[1]:=0; x[1]:=0; y[1]:=0,
{задание исходных составов}. (1)
```

В принципе, инициализация рабочего тела элемента-предка не является обязательной, но её проведение даёт возможность упростить процедуру отладки программы. Более сложной представляется присвоение начальных значений для используемых термодинамических функций. Если для таких свойств как давление, температура, удельный объём, оно не представляет трудностей и сводится к их обнулению, то для калорических величин, связанных с внутренней энергией оно вызывает определённые сложности. К таким величинам в первую очередь можно отнести энтальпию, потенциалы Гиббса и Гельмгольца, значения которых зависят от произвольно выбранной точки отсчёта. Поэтому для этих калорических свойств возможны и имеют место на практике не противоречащие физическим представлениям отрицательные значения.

На сегодняшний день отсутствует хотя бы одно термодинамически обоснованное граничное значение для указанных выше калорических свойств. При их инициализации можно ориентироваться на поддержи-

ваемый компьютером диапазон значений объявленной действительной переменной. Но более обоснованным представляется способ, использующий признак определённости термодинамического состояния рабочего тела.

Под определённым понимается термодинамическое состояние, в котором известны или могут быть вычислены все термодинамические функции рабочего тела. Существует минимальное число (зависящее от числа компонентов в нём) независимых переменных, зная значения которых, можно, используя дифференциальные уравнения термодинамики и условия фазового равновесия, определить требуемые свойства рабочего тела. Для чистого вещества, как известно, это число равно двум, а для  $n$ -компонентной смеси оно составляет  $n+1$ . В набор рассматриваемых независимых переменных, как правило, входит  $n-1$  величина, отражающая какой-либо из составов рабочего тела. Инициализация состава изложена выше. Таким образом, для инициализации всех термодинамических функций достаточно выбрать лишь две из них.

Выбор конкретных свойств, подлежащих исходному заданию, ограничивается лишь одним обязательным условием — они в любом случае должны определять термодинамическое состояние рабочего тела. Тем не менее, при таком выборе желательно учитывать частоту использования выбранной пары независимых переменных в термодинамических расчётах энергетической установки. Самым распространённым набором независимых переменных является температура  $T$  и давление  $p$ . Но его следует исключить из рассмотрения, поскольку в условиях парожидкостного равновесия чистого вещества они взаимосвязаны. Более предпочтительным является выбор в качестве инициализируемых независимых переменных температуры и удельного объёма  $v$  (плотности  $\rho$ ). Они, если исключить из рассмотрения не используемые при термодинамических расчётах энергетических установок специфические линии термодинамической поверхности состояний (например, кривая Бойля [4]), однозначно определяют равновесные свойства рабочих тел. Кроме того, подавляющее большинство известных уравнений состояния представлены зависимостями от  $T$  и  $v$  или от  $T$  и  $\rho$ . Естественно положить при этом нулевым исходное значение температуры. Для переменных  $v$  и  $\rho$ , учитывая, что они являются обратными величинами, целесообразно начальное значение сделать одинаковым и равным  $-1$ .

Способ инициализации термодинамических функций влияет на технологию программного представления определённости термодинамического состояния. Выявление такой определённости даёт возможность избежать дополнительного применения методов вычисления равновесных свойств рабочего тела и формализовать этап окончания термодинамического расчёта.

В работе [5] предлагается для каждого свойства ввести свою логическую переменную, значение которой характеризует его определённость. При этом в данной работе совсем не затрагиваются проблемы, связанные с заданием начальных значений термоди-

намических свойств. Изложенная выше методика позволяет избежать использования множества логических переменных, заменив их единственной переменной такого же типа. Условие определённости в этом случае заключается в истинности этой переменной, которая имеет место, если значения температуры и объёма (плотности) отличаются от соответствующих заданных начальных величин. Изменение начальной величины инициализированного свойства может производиться не только непосредственным использованием оператора присваивания, но и методами расчёта термодинамических свойств при различных наборах независимых переменных. К наиболее распространённым наборам относятся давление-температура, давление-энтальпия. Программно проверка определённости термодинамического состояния сводится к использованию одного логического оператора.

В списке атрибутов  $M$ -точки содержатся данные, необходимые для расчёта эксергии потока. Эти данные, в общем случае, должны отражать сведения о полезности потока и величины, характеризующие окружающую среду. К последним относятся температура окружающей среды  $T_{oc}$ , её давление  $p_{oc}$ , а также состав компонентов и их относительное содержание в окружающей среде. При инициализации элемента ANEL целесообразно положить начальные значения  $T_{oc}$  и  $p_{oc}$ , соответствующие нормальным условиям ( $20^\circ\text{C}$ ;  $0,1013\text{ МПа}$ ). Для криогенных установок исходный состав воздуха и содержание в нём компонентов можно установить исходя из усреднённых данных [6].

Полезность потока устанавливает необходимость использования эксергии потока в данной точке при составлении эксергетических балансов. Как известно, бесполезные потоки, к которым, например, можно отнести отбросные потоки воздуходелительных установок, в эксергетических балансах не участвуют. Полезность потока может быть определена с помощью либо логической, либо соответствующей ей целочисленной переменной. В качестве величины полезности имеет смысл использовать истинное значение, которое гораздо чаще встречается на практике. Если энергетический поток является бесполезным, то задание параметров окружающей среды является излишним.

Инициализация потока рабочего тела, как и любого вида энергетического потока, предполагает задание его направления и расхода  $G$ . Направление материального потока определяется значением функции  $P$ , не зависящей от вида узловой точки [1]:

$$P = \begin{cases} +1, & \text{если точка определяет} \\ & \text{вход потока в элемент;} \\ 0, & \text{если точка не принадлежит элементу} \\ & \text{или исключается из рассмотрения;} \\ -1, & \text{если точка определяет} \\ & \text{выход потока из элемента.} \end{cases} \quad (2)$$

Для элемента-предка исходные величины функции  $P$  в узловых точках задаются в соответствии с его схемой, изображённой на рис. 1. Равенство  $P=0$  для любого вида узловой точки означает, что она не под-

лежит инициализации и все её атрибуты не участвуют в термодинамическом расчёте и анализе такого элемента. Например, трансформированная из элемента ANEL схема испарителя рефрижераторной установки имеет вид, соответствующий рис. 2. Чёрным цветом на нём выделены энергетические потоки, для которых имеет место  $P=0$ .

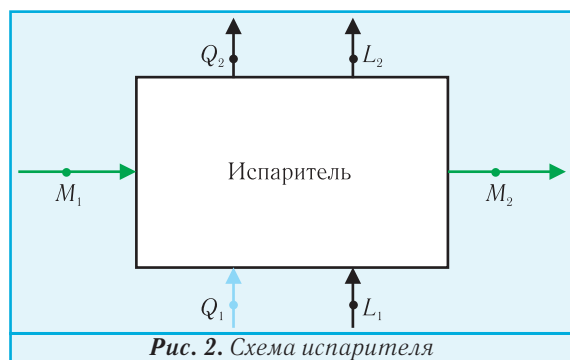


Рис. 2. Схема испарителя

Начальное значение величины расхода  $G$  естественно положить в  $M$ -точках, подлежащих инициализации, равным нулю. Это согласуется с предлагаемым заданием исходных составов для многокомпонентного рабочего тела.

#### 4. ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ УЗЛОВЫХ $E$ -ТОЧЕК

Список атрибутов узловой  $E$ -точки, согласно [1], задаётся следующей последовательностью:

$$(P, C, F, E, D), \quad (3)$$

где функция  $P$  определяется выражением (2). Остальные переменные списка (3) имеют следующий смысл:  $C$  — род энергетического потока;  $F$  — набор характеристик этого потока;  $E$  — набор данных для расчёта эксергии потока;  $D$  — атрибут, характеризующий определённость узловой точки.

Далее рассматриваются особенности инициализации  $E$ -точек на примере элемента-предка. Значения функции  $P$  для узловых  $Q$ - и  $L$ -точек устанавливаются в соответствии со схемой, изображённой на рис. 1.

Атрибут  $C$  является аналогом рассмотренного выше идентификатора рода рабочего тела. Различные способы его задания рассмотрены в работе [1]. Наиболее простыми вариантами определения начальных значений для  $Q$ - и  $L$ -точек является присваивание им соответствующих символов ' $Q$ ' и ' $L$ '.

Для  $F$ -атрибута  $E$ -точек, представляющего собой величину энергетического потока, начальное значение задается равным нулю.

$E$ -атрибут для рассматриваемого типа узловых точек по аналогии с  $M$ -точкой должен содержать сведения о полезности энергетического потока. Способы задания полезности потока для  $E$ -точки и для  $M$ -точки полностью идентичны.

Полезность потока для полностью превратимой формы энергии ( $L$ -точка) является единственным

данным  $E$ -атрибута. Абсолютная величина эксергии теплового потока  $Q_e$  при неизменяющейся температуре теплообмена  $T$  рассчитывается в соответствии с [7]:

$$Q_e = Q \left| \frac{T - T_{oc}}{T} \right|, \quad (4)$$

где  $Q$  — значение теплового потока. Из формулы (4) следует, что при принятом нулевом начальном значении  $Q$  исходная величина  $Q_e$  также равняется нулю. Однако на практике для термодинамического анализа теплообменных аппаратов применить соотношение (4) затруднительно из-за переменности температуры  $T$ . Общая формула [7], связывающая потоки  $Q_e$  и  $Q$ , предполагает сложную процедуру численного интегрирования. По этой причине целесообразно вычислять  $Q_e$  на основе эксергетического баланса рассматриваемого элемента, использующего значения эксергетических функций рабочих тел в узловых точках. Такая замена способа определения  $Q_e$  не влияет на выбор его начального значения.

#### 5. ВЫВОДЫ

Инициализация элемента энергетической установки является начальным этапом создания моделирующих алгоритмов его термодинамического расчёта. И уже на этом этапе возникают проблемы при использовании формализованного подхода к определению узловой точки и элемента установки. Главным образом это касается задания исходных значений термодинамических функций рабочих тел. Предложенный в настоящей работе способ инициализации не всего набора термодинамических свойств, а лишь двух из них представляется самым простым и обоснованным из возможных способов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Троценко А.В. Формализация понятия узловой точки термодинамической системы// Технические газы. — 2008. — № 1. — С. 59-63.
2. Троценко А.В. Формализация элементов низкотемпературных и энергетических систем// Технические газы. — 2010. — № 4. — С. 65-69.
3. Троценко А.В., Валякина А.В. Формализация определения термодинамических свойств рабочих тел из единых уравнений состояния// Технические газы. — 2006. — № 4. — С. 55-58.
4. Казавчинский Я.З. Лекции по технической термодинамике. — М.: Транспорт, 1970. — 276 с.
5. Бодюл С.В., Таран В.Н. Алгоритмизация расчётов циклов криогенных систем. Базовые понятия и принципы// Технические газы. — 2006. — № 4. — С. 12-18.
6. Криогенные системы. Основы проектирования аппаратов, установок и систем/ Архаров А.М., Архаров И.А., Беляков В.П. и др. — М.: Машиностроение, 1999. — 720 с.
7. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика. — М.: Мир, 1977. — 318 с.