

УДК 62–932.2

**МЕТОДЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ
METHODS OF THERMODYNAMIC ANALYSIS
OF LOW-TEMPERATURE SYSTEMS**

К.С. Станиславчик, П.А. Ратомский, А.Е. Федотов

Научный руководитель – П.П. Храмцов, д.ф.-м.н.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

K. Stanislavchik, P. Ratomsky, A. Fedotov

Supervisor – P. Chramtsov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация: В данной статье рассматриваются методы термодинамического анализа: энтропийно-статистический метод и эксергетический метод. Выясняется какой метод лучше при расчёте низкотемпературных установок.

Abstract: This article discusses the methods of thermodynamic analysis: the entropy-statistical method and the energetic method. It turns out which method is better for calculating low-temperature installations.

Ключевые слова: термодинамический анализ, низкотемпературные системы, энтропийно-статистический метод.

Keywords: thermodynamic analysis, low-temperature systems, entropy-statistical method.

Введение

При анализе энергетических систем возможно применение разных методов исследования. Для установок сжижения природного газа основными методами анализа являются энтропийно-статистический метод и эксергетический метод. При выборе метода исследования стоит учитывать зависимость от конкретной анализируемой системы и задачи, которую мы хотим решить. Примерами таких задач могут быть, генерация работы (электроэнергии), ожижение газов, генерация холода и многие другие.

Основная часть

При генерации работы (электроэнергии) использование эксергии, которая измеряет полезность тепла, является наиболее эффективным подходом. Если же целью является генерация холода, то энтропия становится более релевантным понятием. Ее рост требует дополнительных затрат энергии (в виде работы, тепла или электроэнергии) для компенсации [1].

Для систем низкотемпературного охлаждения и ожижения, эффективность работы напрямую связана с обратимостью происходящих в ней процессов. Чем больше необратимость, тем меньше эффективность. Увеличение энтропии служит показателем необратимости процессов [1].

Чтобы лучше понять значение энтропии, ее рост можно представить как дополнительную работу, требуемую для компенсации потерь, вызванных необратимостью процессов.

Анализ технических систем методом потоков эксергии подразумевает выделение определенной области, ограниченной контрольной поверхностью. Эта область может быть целой системой или ее частью, изолированной от других систем или объектов. Затем анализируются все потоки эксергии, пересекающие эту поверхность. Для применения метода потоков эксергии необходимо определить все потоки эксергии в исследуемой системе. Однако, это не всегда возможно [1].

Энтропийный метод упрощает термодинамический анализ, исключая необходимость детального расчета всех потоков эксергии.

Зная первичную организованную энергию, выработанную организованную энергию (эксергию теплоты) можно определить, вычитая из вводимой энергии энергетические потери, возникающие в узлах и элементах системы.

Эти потери рассчитываются как произведение температуры окружающей среды на изменение энтропии в каждом узле и затем суммируются. Итоговая потеря определяется как произведение температуры окружающей среды на суммарное изменение энтропии всех элементов системы (или ее части) [2].

Р. Клаузиус был первым, кто сформулировал принцип возрастания энтропии в реальных, необратимых процессах преобразования энергии. Он ввел понятие суммарного изменения энтропии системы, которое он назвал "потерей работоспособности".

Клаузиус считал положительными изменения, которые происходят спонтанно без затрат работы, а отрицательными - изменения, которые не могут происходить самопроизвольно. Для любого обратимого цикла в едином термодинамическом пространстве вне зависимости от направления протекающих процессов и физических свойств рассматриваемых объектов интеграл по замкнутому контуру будет равен нулю [2]:

$$\oint \frac{dq}{T} = 0 \quad (1)$$

Клаузиус ввел понятие энтропии, обозначив ее как $S = \int \frac{dq}{T}$. Это позволило выразить теплоту как $dq = Tds$. Было также установлено, что энтропия системы зависит только от ее состояния и является непрерывной, однозначной и конечной функцией параметров этого состояния [2].

В расчетах используется изменение энтропии при переходе из одного состояния в другое, а ее численное значение определяется относительно условного начального значения. Это позволяет рассматривать энтропию как свойство объекта в определенном состоянии. Данное уникальное свойство стало основой для энтропийного анализа.[2]

Эксергия, в отличие от энтропии, не является свойством тела, так как ее значение зависит от температуры стока теплоты, которая может быть различной. Эта неоднозначность затрудняет использование эксергии для анализа низкотемпературных систем [2].

В конце XIX и начале XX века, термодинамика переживала бурный период развития. Работы В. Нерста по третьему началу термодинамики и М. Планка

позволили разработать новые принципы и методы анализа энергетических систем. В этот период Ж. Гюи и А. Стодола независимо друг от друга получили формулу для необратимых процессов, аналогичную формуле Клаузиуса.

Главная цель термодинамического анализа – оценить эффективность установки и найти пути снижения энергозатрат для достижения желаемого результата.

Д.П. Гохштейн разработал энтропийный метод для оценки потерь в системах, основываясь на методе вычитаний Клаузиуса. Этот метод позволяет определить затрачиваемую работу только на входе в систему, а затем, используя аддитивность энтропии, вычесть все потери, рассчитанные по отдельности, из общей входной работы. Таким образом, энтропийный метод позволяет количественно оценить преобразование входной энергии в энтропию в каждом отдельном узле системы. Работа любой реальной машины всегда сопровождается необратимыми процессами, которые приводят к возрастанию энтропии системы.

В результате машина требует больше тепла для работы, а полезная работа, которую она производит, уменьшается, что подтверждается первым законом термодинамики. Таким образом, общая энтропия всех составляющих машины увеличивается из-за этих необратимых процессов. Именно на этом принципе основан энтропийно-статистический анализ [2].

В МГТУ им. Баумана был разработан улучшенный энтропийный метод, позволяющий определить реальные затраты энергии, необходимые для компенсации энтропии, возникающей в узлах существующих установок. Формула Клаузиуса, Гюи и Стодолы [2]:

$$\Delta l = T_{oc} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta S'_i, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^n \Delta S'_i$ – суммарная величина производства энтропии вследствие необратимости во всех n подсистемах.

Это уравнение позволяет оценить не только теоретические, но и практические затраты энергии, необходимые для компенсации энтропии, возникающей в процессе работы. Для более точного определения реальных затрат энергии можно использовать средние показатели эффективности машин и узлов, работающих при тех же температурных условиях, что и рассматриваемая система. Данные показатели можно получить на основе анализа типичных процессов, таких как трение или неравновесный теплообмен. Формула (2) в низкотемпературных установках может быть определена следующим образом [2]:

$$L_{\text{действ}} = \sum l_{\text{min}} + \left(T_{oc} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta S'_i \right)_{\text{действ}}, \quad (3)$$

где $\sum l_{\text{min}}$ – сумма минимальных затрат работы для достижения поставленных технологических целей;

$(T_{oc} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta S_i')$ – величина ожидаемых реальных затрат энергии для компенсации производства энтропии во всех n элементах установки.

Заключение

Таким образом стоит обратить внимание, что при расчете низко температурных установок стоит воспользоваться энтропийным методом. Это позволяет грамотно оценить производство и расход энтропии, что на самом деле очень важно при расчете низкотемпературных установок на примере установок, использующих сжиженный природный газ.

Литература

1. Красноносова Серафима Дмитриевна. Исследование малотоннажных установок сжижения природного газа энтропийно-статистическим методом: диссертация ... кандидата технических наук: 05.04.03 / Красноносова Серафима Дмитриевна; [Место защиты: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана]. - Москва, 2016.- 173 с.
2. Архаров А.М. И еще раз об энтропии и задаче определения реальных (действительных) величин энергетических потерь вследствие необратимости / А.М. Архаров, В.В. Сычев // Холодильная техника. – 2007. – № 4. – С. 8–13.