

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСТИЛЛЯЦИОННЫХ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК.

Муралев Е.Д., Балиева Э.Н.

Мақалада дистилляттық тұщыту қондырғыларының дистиллят өндірісіндегі энергия шығындарын төмендету жолдарын іздеудегі жылуалмастырғыш жабдығы жұмысының эксергетикалық анализінің нәтижелері сипатталған.

This article describes the results of exergy analysis of heat transfer equipment distillation desalination units to find ways to reduce energy consumption of distillate production..

Исследования эффективности работы теплообменного оборудования являются основой совершенствования схем и конструкций теплоэнергетических установок и аппаратов. На протяжении многих лет не признаваемый официально метод эксергетического анализа является действенным средством поиска технических решений по повышению энергоэффективности оборудования, распределение и использование энергоресурсов, термодинамическое совершенство тепловых схем и аппаратов. Основное его отличие от распространенных методов, использующих материальные и энергетические балансы в том, что эксергетический метод учитывает различия между неограниченно превратимыми видами энергии (механическая, электрическая, химическая, атомная) и ограниченно превратимыми (внутренняя энергия, теплота).

В энергетическом балансе электроэнергия и теплота учитываются как равнозначные, без учета качества, по общему количеству энергии, хотя все реальные процессы происходят в условиях взаимодействия с окружающей средой и использоваться может далеко не вся и не всякая энергия. Например, в охлаждающем теплообменнике не может использоваться тепловая энергия рабочей среды, если ее температура равна или менее температуры охлаждающего потока. И если в качестве охлаждающей среды используется вода открытого водоема, то, соответственно минимально возможная рабочая температура будет изменяться в течение года.

При помощи эксергетического анализа можно просто и наглядно оценивать процессы и технические системы, в которых преобразование энергии имеет существенную роль.

Основными задачами эксергетического анализа являются:

- оценка энергоносителей и энергоресурсов, в том числе вторичных, в пределах технологического процесса или установки;
- анализ термодинамической эффективности технологических узлов, аппаратов, определяемой затратами энергии в установке и потерь по элементам;
- термодинамическая оптимизация установки – минимизация потерь эксергии.

Применение эксергетического анализа для опреснительной техники и технологии в конечном итоге позволит снизить удельные затраты энергии на получение дистиллята и снизить себестоимость продукции.

Эксергия представляет собой неограниченно превратимую часть энергии, которая может быть получена при обратимом переходе системы из данного состояния в состояние равновесия с окружающей средой.

В общем виде эксергия потока вещества определяется выражением:

$$E = E_{\kappa} + E_p + E_x + E_t + E_{\text{я}}; \quad (1)$$

где E_{κ} – кинетическая эксергия потока вещества;

E_p – потенциальная эксергия;

E_x – химическая эксергия;

E_t – термодинамическая (физическая) эксергия;

$E_{\text{я}}$ – ядерная эксергия.

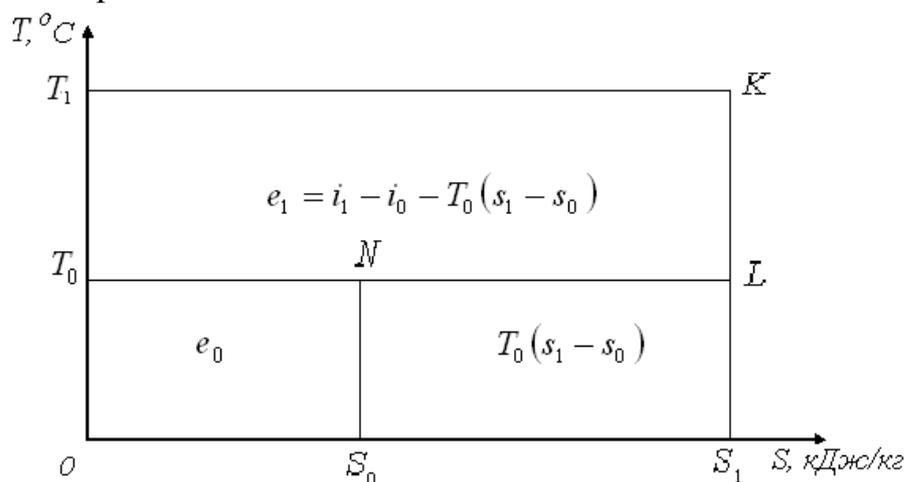


Рис. 1 - Понятие эксергии.

На рис. 1 графически T-S диаграмме показано различие между понятиями энергии, эксергии и анергии. Так, площадь прямоугольника представляет собой удельную тепловую энергию или энтальпию при температуре рабочего тела (или среды) T_1 , площадь прямоугольника O-T₀-N-S₀ определяет удельную величину тепловой энергии охлаждающей среды, площадь прямоугольника S₀-N-L-S₁ представляет собой удельную величину неиспользуемой в рабочем цикле тепловой энергии, так называемую анергию, и соответственно удельная эксергия рабочего вещества на данном рисунке представлена площадью прямоугольника T₀-T₁-K-L.

Для процесса термической дистилляции В. Н. Слесаренко и А. С. Штым и предложили следующую формулу:

$$e = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) C_p dT + \int_2^3 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dh + R \int_1^2 \frac{1}{T} \frac{da}{a}; \quad (2)$$

где первое слагаемое представляет затраты энергии на нагревание, второе на испарение, третье – затраты энергии на разделение.

h – энтальпия воды;

a – активность воды в растворе;

$R = 8.303 \text{ кДж / кмоль} \cdot \text{К}$ – универсальная газовая постоянная.

Теоретически установлено, что распределение эксергии по опреснительной установке происходит примерно следующим образом:

Нагрев – 2,5...9,7 %

Парообразование - 63...89 %

Работа разделением – 1,3...35 %

В любом балансе должно соблюдаться равенство входящих и выходящих потоков. Применительно к эксергии баланс выглядит следующим образом:

$$E' = E'' + D; \quad (3)$$

где E' , E'' – соответственно подведенная и отведенная от системы эксергия;
 D – суммарные потери.

В свою очередь:

$$E' = E'_{ГП} + E'_{\text{э}} + E'_{\text{кин}}; \quad (4)$$

где $E'_{ГП}$ – эксергия греющего пара;

$E'_{\text{э}}$ – электрическая эксергия;

$E'_{\text{кин}}$ – механическая эксергия, приносимая в систему потоком пара и морской воды.

$$E'' = E_D + E_K + E_{ОВ}; \quad (5)$$

где E_D – эксергия, отведенная от системы вместе с дистиллятом;

E_K – эксергия, отведенная от системы вместе с концентратом (упаренной морской водой);

$E_{ОВ}$ – эксергия, отведенная от системы с охлаждающей морской водой.

$$D = D_{ТП} + D_{ТВ} + D_H + D_{OC} + D_{ИА} + D_{П} + D_P; \quad (6)$$

где $D_{ТП}$ – потери в трубопроводах пара;

$D_{ТВ}$ – потери в трубопроводах воды;

D_H – потери на трение в насосах;

D_{OC} – потери в окружающую среду;

$D_{ИА}$ – потери в испарительных аппаратах;

$D_{П}$ – потери на нагрев в подогревателях, основном и вспомогательном конденсаторах, охладителе дистиллята;

D_P – потери на разделение.

В имеющейся литературе встречаются в основном готовые формулы для определения того или иного вида потерь по теплоиспользующим установкам в зависимости от параметров состояния или производных от них величин. Так, потери на разделение:

$$D_P = T_0 h \left(\frac{1}{T_H''} - \frac{1}{T_H} \right) \quad (7)$$

где h – изменение энтальпии раствора в испарительном аппарате;

T_H – температура кипения воды;

T_H'' – температура насыщенного пара;

T_0 – температура холодного источника (охлаждающей морской воды).

Потери в трубопроводах пара и морской воды:

$$D_{III} = T_0 G_{II} \Delta P (C_p - C_v) / P' \quad (8)$$

$$D_{TB} = T_0 G_B P / \rho' T' \quad (9)$$

где D_{III} , D_{TB} - соответственно потери эксергии в трубопроводах пара и воды;
 G_{II} , G_B - соответственно расход пара и воды на данном участке трубопровода;
 ΔP - разность давлений на входе и выходе из трубопровода;
 T_0 - температура холодного источника в системе;
 C_p , C_v - соответственно изобарная и изохорная теплоемкости;
 P' - давление в трубопроводе;
 ρ' - удельная плотность;
 T' - температура жидкости.

Также существуют ряд формул для каждого вида потерь. Поскольку во все эти формулы входят величины связанные с параметрами состояния, либо сами эти параметры, то представляется целесообразным, для разработки удобной методики анализа технологической установки, вернуться к первоначальному определению эксергии.

$$e = i_1 - i_0 - T_0 (s_1 - s_0); \quad (10)$$

где e - удельная эксергия;

i_1 , i_0 - удельная энтальпия и энтропия в расчетной точке;

s_1 , s_0 и t_0 - удельная энтальпия, энтропия и температура холодного источника системы.

Таким образом, если нам необходимо определить потерю эксергии на каком-либо элементе, необходимо будет лишь знать параметры состояния в двух точках – на входе и выходе из анализируемого участка объекта. Тогда:

$$\Delta e = e_1 - e_2 = i_1 - i_2 - t_0 (s_1 - s_2); \quad (11)$$

Где Δe - изменение удельной эксергии;

e_2 , i_2 , s_2 - соответственно эксергия, энтальпия и энтропия в точке 2.

При дальнейших расчетах примем следующие допущения:

- в любой точке технологической схемы десятикорпусной опреснительной установки вода и пар находятся на линии насыщения;
- образующийся в установке пар имеет степень сухости равную единице;
- потерь на гидравлическое сопротивление в трубопроводах морской воды до ВА-1, в дистиллятопроводах после самоиспарителей дистиллята и в теплообменных трубках подогревателей и выпарных аппаратов численно равны затратам электроэнергии на привод насосов;
- наличие в упариваемой воде затравки существенно не изменяет ее эксергию.

Для расчета удельных значений энтальпии и энтропии использовались упрощенные корреляционные уравнения для пара, морской воды и дистиллята.

Полная эксергия потока равна:

$$E = eG; \text{кВт}; \quad (12)$$

где e - удельная эксергия по формуле (10), кДж/кг;

G - расход жидкости или пара, кг/с.

В этом случае потери эксергии определяются, как:

$$E = \Delta e G; \text{кВт}; \quad (13)$$

где e - удельные потери эксергии по формуле (11), кДж/кг;

G - массовый расход потока, кг/с.

Для потерь на трение, депрессию и других теплофизических процессов, проходящих без изменения фазового состояния, без теплообмена и в неразрывном потоке потери удельной эксергии будут определяться довольно просто. Поскольку процесс адиабатный $i_1 = i_2$, и

$$\Delta e_{1-2} = T_0(s_2 - s_1); \text{кДж/кг}; \quad (14)$$

где Δe_{1-2} - удельные потери эксергии на участке 1-2, кДж/кг;

s_1, s_2 - удельная энтропия в точках 1 и 2, кДж/кг;

T_0 - температура холодного источника системы, $^{\circ}\text{C}$.

Дело обстоит по-другому, когда на анализируемом участке тепловой схемы происходит теплообмен двух или более сред или фазовое преобразование. В этом случае придется решить систему уравнений, опирающуюся на закон сохранения энергии и понятие эксергии.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n i_1 G_1 = \sum_{i=1}^k i_2 G_2; \\ \sum_{i=1}^n e_1 G_1 = \sum_{i=1}^n e_2 G_2; \end{cases} \quad (15)$$

где G_1, G_2 - соответственно массовые расходы входных и выходных потоков на анализируемом участке, кг/с;

i_1, i_2 - энтальпии входных и выходных потоков, кДж/кг;

e_1, e_2 - эксергии входных и выходных потоков, кДж/кг.

Решая данную систему уравнения получим следующее уравнение, определяющее потери эксергии при теплообмене и фазовых превращениях для двух потоков:

$$e_{12} = T_0 \left[s_{1j} - s_{1i} - \frac{i_{1j} - i_{1i}}{i_{2j} - i_{2i}} (s_{2j} - s_{2i}) \right]; \quad (16)$$

где s_{1j}, s_{1i} - энтропия первого потока на входе и выходе из анализируемого участка, кДж/кг К;

s_{2j}, s_{2i} - энтропия второго потока на входе и выходе из участка, кДж/кг К;

i_{1j}, i_{1i} - энтальпия первого потока на входе и выходе из участка, кДж/кг;

i_{2j}, i_{2i} - энтальпия второго потока на входе и выходе из анализируемого участка, кДж/кг.

Если в объекте имеется несколько потоков, то потери суммируются по всем входным или выходным потокам.

Замеры проводились на ДООУ-7, ДООУ-8, ДООУ-10 после проведения планового ремонта и кислотной очистки оборудования для того, чтобы иметь данные по гарантированно чистой от накипи установке с минимальным износом лопастей циркуляционных насосов. На ДООУ-7,8 замеры производились в течение всего пробега. Для измерения температур использовались лабораторные термометры с ценой деления шкалы $0,1^{\circ}\text{C}$, расходы и давление измерялись штатными средствами, имеющимися на установке.

Результаты расчетов представлены в нижеприведенных таблицах и рисунках. На рис.2 показано усредненное по всем замерам распределение эксергии входных потоков. Приведены значения эксергии потока греющего пара, электроэнергии, острого пара на парозежекторный блок.

Распределение входной удельной эксергии по десятикорпусным опреснительным установкам (на 1 тонну дистиллята)

Таблица 1

№ ДОУ	Греющий пар, кДж/т	Э/эн, кДж/т	Пар ПЭБ, кДж/т
ДОУ-10	306,59	19,36	10,98
ДОУ-7	330,34	21,95	13,30
ДОУ-8	310,36	18,62	11,73
Ср.знач.	315,77	19,98	12,01

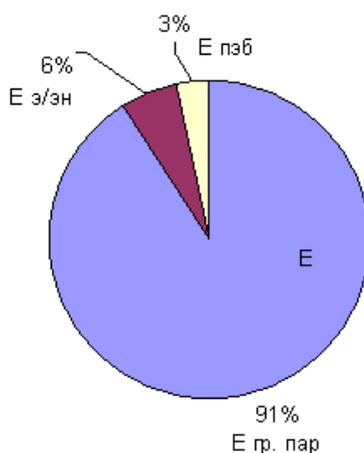


Рис. 2 - Распределение входных потоков эксергии по ДОУ.

Из рис.2 видно, что большая часть энергии, используемой в процессе опреснения поступает с греющим паром от ТЭЦ.

Распределение удельных потерь эксергии по десятикорпусным опреснительным установкам (на 1 тонну дистиллята)

Таблица 2

№ ДОУ	Потери с охлажд. водой, кДж/т	Потери с упаренной водой, кДж/т	Потери с дистиллятом, кДж/т	Технолог. потери, кДж/т
ДОУ-7	196,88	43,33	35,72	54,58
ДОУ-8	179,12	41,67	28,82	66,73
ДОУ-10	202,27	42,06	19,36	42,93
Ср.знач.	192,76	42,35	27,97	54,75

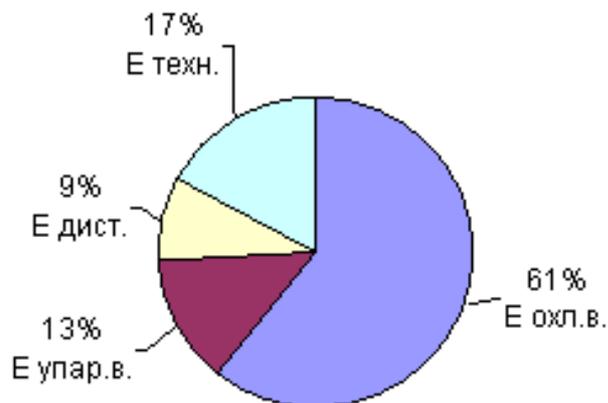


Рис.3 - Распределение потерь эксергии по ДОУ.

Анализируя диаграмму на рис.3, можно видеть, что большое количество эксергии сбрасывается с охлаждающей водой. Уменьшить эту можно двумя путями: увеличением числа ступеней испарения, чтобы уменьшить при сохранении производительности нагрузку на основной и вспомогательной установки это решение нецелесообразно, поскольку стоимость выпарных аппаратов весьма велика, и появившаяся в результате модернизации экономия тепла будет перекрыта эксплуатационными затратами. Второй путь предполагает оптимизации технологического режима с уменьшением сброса охлаждающей воды.

Велики потери со сбрасываемым рассолом. Здесь тоже возможны варианты: увеличение степени концентрирования с разработкой соответствующего водно-химического режима; установка дополнительного теплообменника типа жидкость-жидкость для нагрева воды, поступающей на вторую ступень деаэрации, и, самый простой – установка самоиспарителя на сбросе рассола с девятого аппарата, а образующийся в самоиспарителе пар завести в основной конденсатор.

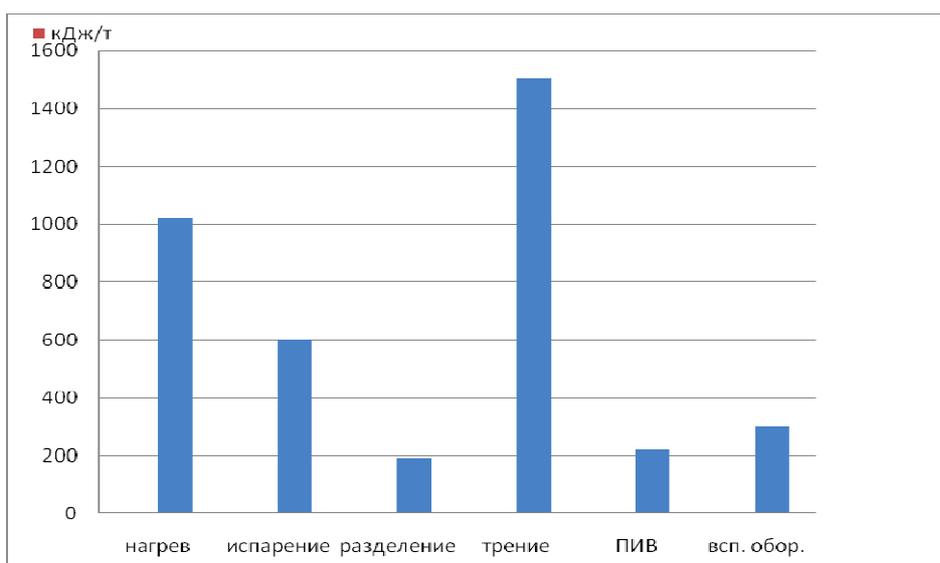


Рис. 4 - Распределение потерь эксергии по выпарному аппарату ДОУ

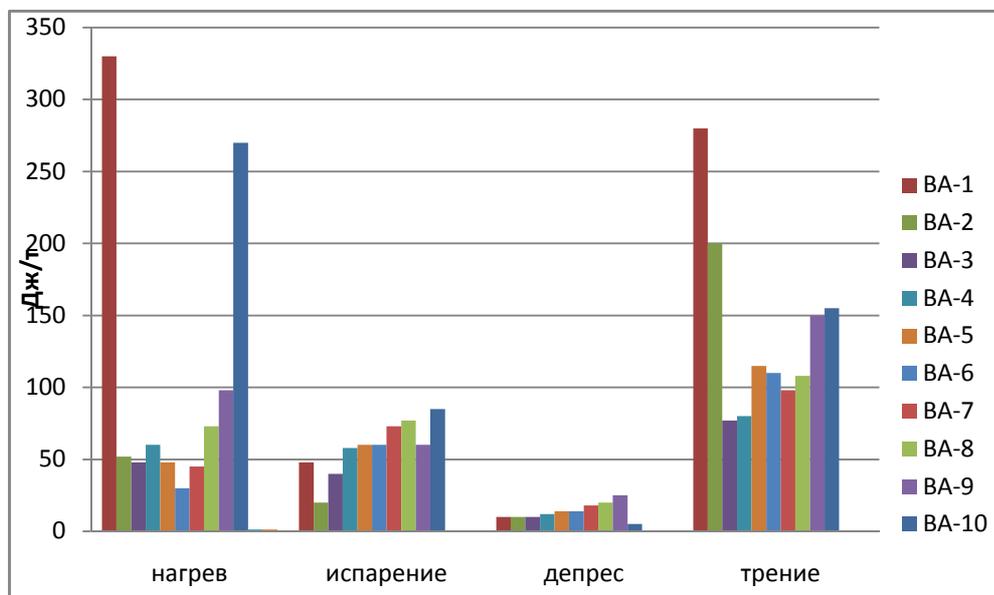


Рис. 5 - Распределение потерь эксергии по выпарным аппаратам ДОУ.

Заключение

На основе вышеприведенного анализа тепловых потерь можно предложить модернизированную схему десятикорпусной опреснительной установки, отличающейся от существующей предвключенным подогревателем, наличием самоиспарителя на сбросе упаренного рассола с девятого аппарата и подачей потока воды на испарение после подогревателя воды через конденсаторы парожеткторного блока на деаэрактор.

Литература:

1. Слесаренко В.Н. Дистилляционные опреснительные установки. – М.: Энергия, 1980.- 248с., ил. - 119с.
2. Слесаренко В.Н. Опреснение морской воды.- М.: Энергоатомиздат, 1991.- 278с.: ил. – 12с.
3. Колодин М.В. Экономика опреснения воды.- М.: Наука, 1985. – 42с.
4. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Анализ потерь эксергии в теплотехнологических схемах угольных мини-ТЭС // Энергосбережение - теория и практика: тр. 4 междунар. шк.-семинара молодых ученых и специалистов, Москва, 20-24 окт. 2008. - М.: МЭИ(ТУ). - 2008. - С.51-57.