

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

2010

С Новым
годом!



Упрощенный метод определения эксергетического КПД сложной тепловой схемы технологического процесса

Казаков В. Г., доктор техн. наук, Луканин П. В., канд. техн. наук, Смирнова О. С., инж.

Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров

Предложен упрощенный метод инженерного эксергетического расчета, основанный на приращении эксергий в процессе термического взаимодействия материальных потоков. Определена связь эксергетического КПД тепловой схемы с эксергетическим КПД ее элементов через привычные для пользователя параметры — расход рабочего тела, тепловой поток, истинная температура теплоносителя и др. Такая информация позволяет выполнить эксергетический анализ рассматриваемой тепловой схемы и сформулировать термодинамические требования по ее совершенствованию с позиций энергосбережения.

Ключевые слова: эксергетический расчет тепловой схемы, эксергетический анализ, эксергетический КПД, энергосбережение, теплообменники.

Одним из основных параметров в расчетах эксергетического КПД теплопередачи является среднетермодинамическая температура нагрева (охлаждения) материальных потоков в процессе их энергетического взаимодействия. Она определяется как отношение изменения (приращения) энтальпии нагреваемого (охлаждаемого) потока к соответствующему приращению энтропии этого потока. В практических инженерных расчетах при составлении балансов энергии в форме теплоты обычно используют понятия температуры, энтальпии и др.

В настоящей статье рассмотрен метод определения эксергетического КПД сложной теплоиспользующей схемы и показана связь между эксергетическим КПД ее элементов и эксергетическим КПД сложной теплоиспользующей схемы через привычные для пользователя параметры. Первая такая попытка была предпринята в [1].

Для вычисления эксергетического КПД сложной тепловой схемы рассмотрим следующие соотношения.

Удельный тепловой поток, переданный (воспринятый) в i -м теплообменнике

$$q_i = \Delta Q_i / \Sigma \Delta Q_i, \quad (1)$$

где ΔQ_i — тепловой поток, переданный (воспринятый) в i -м теплообменнике; $\Sigma \Delta Q_i$ — сумма тепловых потоков, переданных (воспринятых) во всех элементах рассматриваемой системы.

Приведенный тепловой поток для i -го теплообменного аппарата:

нагреваемый поток

$$q_{\text{пр.н}} = q_i / T_{\text{н}i}^T; \quad (2)$$

охлаждаемый поток

$$q_{\text{пр.о}} = q_i / T_{\text{о}i}^T, \quad (3)$$

где $T_{\text{н}i}^T$ и $T_{\text{о}i}^T$ — среднетермодинамические температуры нагреваемой и охлаждаемой сред.

В большинстве случаев при термодинамическом анализе тепловых схем технологических процессов среднетермодинамическая температура отдельных потоков T^T может быть выражена через их истинные температуры:

для процессов без фазовых превращений

$$T^T \approx (T_{\text{н}} + T_{\text{к}}) / 2; \quad (4)$$

для процессов при фазовом переходе первого рода

$$T^T \approx T_s, \quad (5)$$

где $T_{\text{н}}$ и $T_{\text{к}}$ — температуры потока в начале и конце теплового процесса; T_s — температура фазового перехода.

Относительные погрешности по приближенным выражениям (4) и (5), полученные путем разложения в ряд Тейлора точных формул для процессов без фазовых превращений,

$$\delta_1 = \frac{1}{3} \left(\frac{T_{\text{н}} - T_{\text{к}}}{T_{\text{н}} + T_{\text{к}}} \right)^2, \quad (6)$$

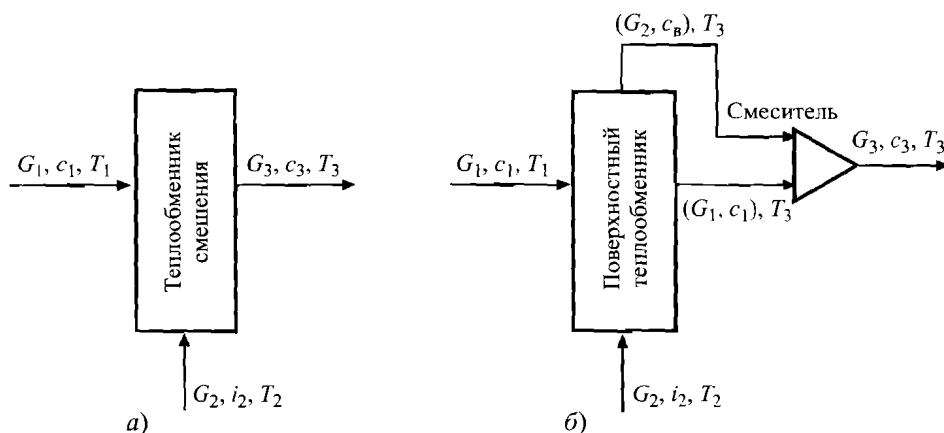


Рис. 1

а для процессов с учетом фазовых переходов при наличии перегрева пара и переохлаждения конденсата

$$\delta_2 \approx \frac{T_s}{2r} [c_1(\Delta T_1/T_s)^2 - c_2(\Delta T_2/T_s)^2], \quad (7)$$

где c_1 и c_2 — теплоемкости конденсата и перегретого пара; ΔT_2 , ΔT_1 — перегрев пара и переохлаждение конденсата; r — удельная теплота фазового перехода.

Как известно [2], эксергетический КПД сложной тепловой схемы η_e можно найти из уравнения

$$\eta_e = \Sigma \Delta e_{qн} / \Sigma \Delta e_{qо}, \quad (8)$$

где $\Sigma \Delta e_{qн}$ и $\Sigma \Delta e_{qо}$ — суммы приращений эксергий всех нагреваемых и охлаждаемых потоков.

Раскроем числитель и знаменатель уравнения (8) через значения для единичного теплообменного аппарата:

$$\eta_e^T = \frac{\Delta Q_n (1 - T_{о.с} / T_n^T)}{\Delta Q_o (1 - T_{о.с} / T_o^T)}, \quad (9)$$

где ΔQ_n и ΔQ_o — тепловые потоки нагреваемой и охлаждаемой сред; $T_{о.с}$ — температура окружающей среды (для большинства встречающихся в практике случаев можно принять $T_{о.с} = 300$ K).

Отсюда с учетом формул (1)–(3) можно получить эксергетический КПД для сложной адиабатической тепловой схемы:

$$\eta_e = \frac{1 - T_{о.с} \Sigma q_{пр.н}}{1 - T_{о.с} \Sigma q_{пр.о}}. \quad (10)$$

Найдем связь между эксергетическим КПД элемента η_{ei} и тепловой схемы в целом η_e . Рассчитаем долю затраченной эксергии в i -м элементе γ_i от общей эксергии, затраченной в схеме:

$$\gamma_i = \frac{\Delta e_{qoi}}{\Sigma \Delta e_{qoi}} = \frac{q_i (1 - T_{о.с} / T_{oi}^T)}{\Sigma [q_i (1 - T_{о.с} / T_{oi}^T)]}. \quad (11)$$

Отсюда общий КПД тепловой схемы

$$\eta_e = \Sigma \gamma_i \eta_{ei}. \quad (12)$$

В теплообменниках рекуперативного типа при расчете эксергетического КПД определение приращения эксергии нагреваемых и охлаждаемых потоков не представляет труда. Некоторое затруднение вызывает определение приращения эксергии в процессах, осложненных массообменом. Можно привести тепловой процесс с массообменом к процессу в рекуперативном теплообменнике и идеальном смесителе (разделителе), которые работают последовательно. Эта условная схема (при сохранении материальных и энергетических балансов) позволяет относительно просто рассчитать приращения эксергий материальных потоков в тепловом процессе, осложненном массообменом.

Рассмотрим типичные теплоиспользующие установки производства целлюлозы и бумаги, где тепловые процессы осложнены массообменом.

Теплообменник смешения (рис. 1) предназначен для нагрева рабочего тела теплоносителем — насыщенным паром. В схемах приняты следующие обозначения: G_1 , c_1 , T_1 и G_3 , c_3 , T_3 — расходы, удельные теплоемкости и температуры нагреваемого потока на входе

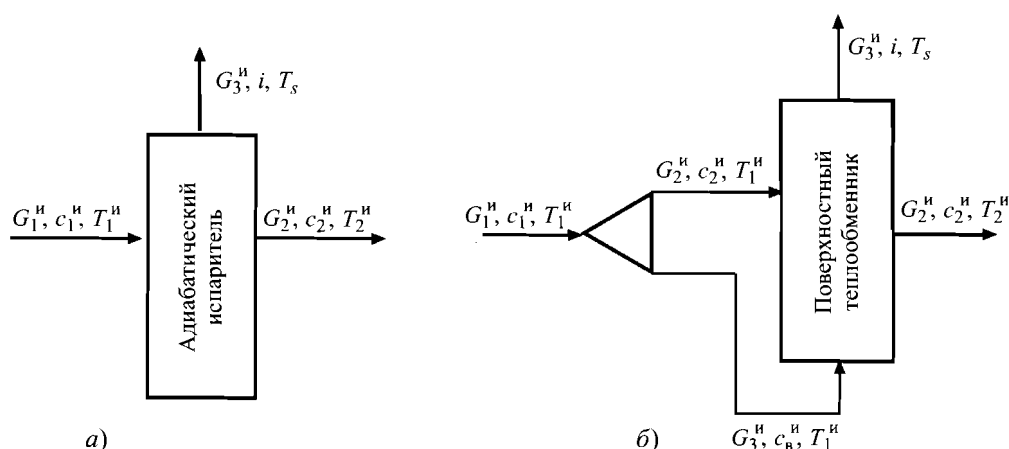


Рис. 2

и выходе теплообменника; G_2 , i_2 , T_2 — расход, энтальпия и температура охлаждаемого потока на входе в теплообменник; $c_в$ — удельная теплоемкость воды.

Приведем рассматриваемый процесс теплообмена (рис. 1, а) к процессу в рекуперативном (поверхностном) теплообменнике. Для этого условно разделим выходной (нагретый) поток на два: первый — равный по массе нагреваемому потоку, второй — равный по массе охлаждаемому потоку (рис. 1, б). При этом для обоих потоков T_3 — *idem*. Так как при определении приращения эксергии используются балансы массы и энергии потоков, практически удобно нагретый поток разделить не по массам, а по их водяным эквивалентам. Эксергетический КПД такого процесса

$$\eta_e^T = \frac{\Delta e_{qH}}{\Delta e_{qO}} = \frac{G_1 c_1 (T_3 - T_2) (1 - T_{oc} / T_H^T)}{G_2 (i_2 - c_в T_3) (1 - T_{oc} / T_O^T)} = \frac{1 - T_{oc} / T_H^T}{1 - T_{oc} / T_O^T}. \quad (13)$$

Адиабатический самоиспаритель (рис. 2) предназначен для концентрирования и охлаждения алюминатного раствора. Процесс в этом элементе относится к процессу дросселирования перегретого алюминатного раствора с внутренним энергообменом. Эти самоиспарители нашли широкое применение в аппаратурно-технологических схемах варки щепы при производстве целлюлозы, бумаги, в котельной практике в качестве расширителей продувки и других теплоиспользующих процессах. Для приведения теплового процесса (см. рис. 2, а) к процессу в рекуперативном теплообменнике условно разделим входящий поток на два:

один по массе равен нагреваемому потоку (пару), другой — охлаждаемому (рис. 2, б). На рис. 2 приняты следующие обозначения: G_1^n , c_1^n , T_1^n и G_2^n , c_2^n , T_2^n — расходы, удельные теплоемкости и температуры перегретого раствора на входе и выходе испарителя; G_3^n , i , T_s — расход, удельная энтальпия и температура пара вскипания раствора.

Эксергетический КПД такого процесса

$$\eta_e^T = \frac{\Delta e_{qH}}{\Delta e_{qO}} = \frac{G_3 (i - c_в T_1^n) (1 - T_{oc} / T_H^T)}{G_2 c_2 (T_1^n - T_2^n) (1 - T_{oc} / T_O^T)} = \frac{1 - T_{oc} / T_H^T}{1 - T_{oc} / T_O^T}. \quad (14)$$

Выпарной аппарат (рис. 3) — основное теплообменное устройство для концентрирования растворов при производстве целлюлозы. В этом аппарате протекают процессы теплообмена с массообменом. В общем случае удаление воды из раствора происходит за счет как внутреннего энергообмена (адиабатического дросселирования перегретого раствора), так и внешнего — путем теплопередачи энергии пара к раствору через теплообменную поверхность.

Рассмотрим изотермический процесс концентрирования черного щелока, поступающего в выпарной аппарат при температуре кипения в нем (см. рис. 3, а). С целью приведения теплового процесса к процессу в рекуперативном теплообменнике входной поток разделим на два: один — равный по массе образующемуся вторичному пару, другой — концентрированному раствору. Тогда процесс выпарива-

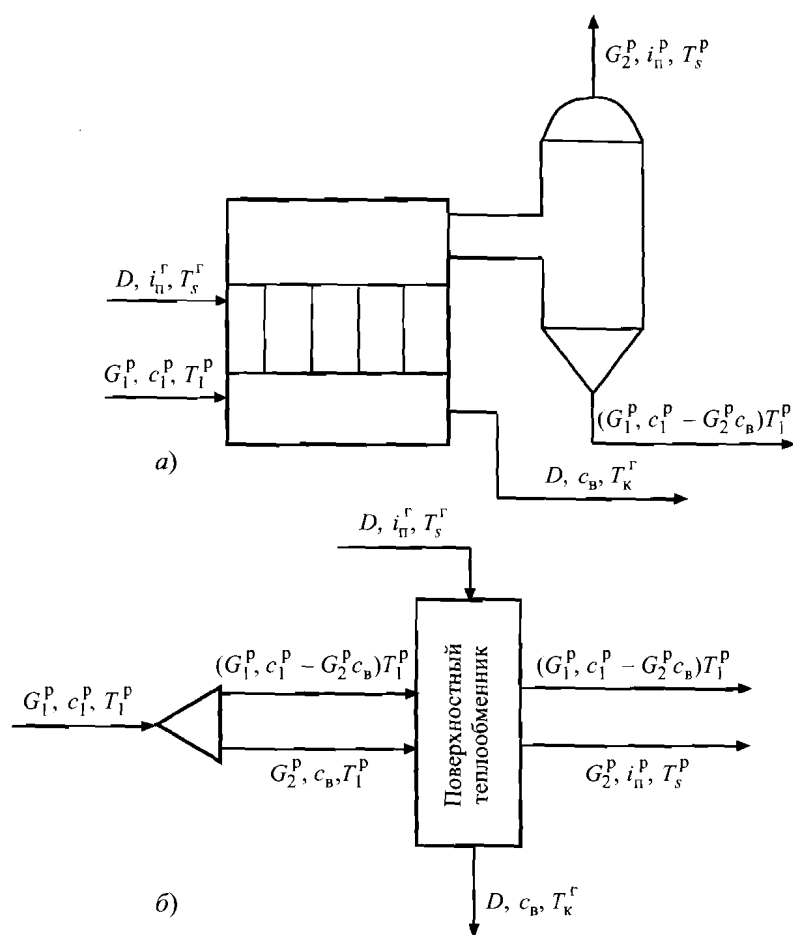


Рис. 3

ния может быть приведен к процессу в рекуперативном теплообменнике (рис. 3, б).

Поскольку поток с параметрами (G_1^p, c_1^p, T_1^p) , c_1^p и T_1^p проходит через теплообменник, не претерпевая никаких изменений, имеются два потока: один — нагреваемый, который превращается из воды с температурой T_1^p в водяной пар, другой — охлаждаемый, энергия фазового перехода которого используется для выпаривания раствора. На рис. 3 приняты следующие обозначения: G_1^p, c_1^p, T_1^p — расход, удельная теплоемкость и температура черного щелока, поступающего в выпарной аппарат; G_2, i_{Π}^p, T_s^p — расход, удельная энтальпия и температура пара испарения; D, T_s^r и T_k^r — расход, температура насыщения греющего пара и температура конденсата; c_b — теплоемкость воды.

Эксергетический КПД такого процесса

$$\eta_e = \frac{\Delta e_{qH}}{\Delta e_{qO}} = \frac{G_2^p (i_{\Pi}^p - c_1^p T_1^p) (1 - T_{oc} / T_H^r)}{D (i_{\Pi}^r - c_b T_s^r) (1 - T_{oc} / T_0^r)} = \frac{1 - T_{oc} / T_H^r}{1 - T_{oc} / T_0^r}. \quad (15)$$

Достоинством предложенного метода расчета эксергетического КПД тепловой схемы является не только возможность последующей формулировки термодинамических требований по ее совершенствованию с позиций энергосбережения, но и использование привычных для теплотехников и технологов понятий “расход рабочего тела”, “тепловой поток”, “истинная температура теплоносителя” и др.

Список литературы

1. Казаков В. Г., Фитерман М. Я., Певзнер И. З., Черняк Н. В. Эксергетический анализ тепловых систем гидрометаллургических процессов. — Изв. вузов. Энергетика, 1975, № 4.
2. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. — М.: Энергия, 1973.