

УДК 66.011.3+536.722

**ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ЦИКЛОННОГО ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩЕГО АППАРАТА**

Доктор техн. наук В. К. Бишимбасв

Канд. техн. наук Т. О. Омарбеков

Рассмотрены эксергетические показатели эффективности работы пылеулавливающего аппарата циклонного типа, когда аппарат используется одновременно и как теплообменник. Составлены тепловые и эксергетические балансы аппарата со встречными закрученными потоками. Изложены методика расчета термодинамических и эксергетических КПД процесса теплообмена и пылеулавливания. На примере сжигания Джибастузского угля показаны результаты расчета эксергетических показателей эффективности работы тепло- и массообменного аппарата.

Многие процессы, протекающие в химической технологии, энергетике связаны с тепло- и массообменом рабочих веществ и теплообменом устройств с окружающей средой. Одним из таких аппаратов является вихревые пыле- и аэрозоляосадители, которые могут использоваться также, как и теплообменники. Использование в энергетике вихревых пылеосадителей одновременно как теплообменников практически не встречается. Поэтому вопросы проектирования и термодинамической оценки эффективности работы таких аппаратов являются актуальными.

В работе рассматриваются эксергетические показатели эффективности работы аппаратов вихревого типа.

Для оценки эффективности работы тепло- и массообменного аппарата вихревого типа необходимо анализировать ряд протекающих в нем процессов и выделить основные показатели, учитывающие особенности этих процессов. Эти показатели можно

выделить в результате анализа схемы потоков эксергии тепло- и массообменного устройства. Согласно этой схеме эксергию на входе в аппарат E' составляют два эксергетических потока E_x'' и $E_{см}''$. Первый поток - горячая среда (смесь газов с твердыми частицами). Эксергию, полученную в результате всех энергетических преобразований в аппарате на ее выходе E' можно разделить на эксергию нагретого холодного теплоносителя (E_x'') и на эксергию вторичных ресурсов ($E''_{в.р.}$). Здесь эксергия (E_x'') состоит из полезной ($\Delta E_{пол}$) и эксергии (E_x'), т.е. $E_x'' = \Delta E_{пол} + E_x'$. Эксергия вторичных энергоресурсов состоит из эксергии выходящего из аппарата горячего теплоносителя (газ с неосажденными твердыми частицами) [$E_r'' + (\eta - 1)E''_{тв}$] и эксергия твердых осажденных частиц ($\eta E''_{тв}$). Если на основе схемы составить эксергетический баланс, то получится

$$E' = E_{РАС} = E_x' + (E_r' + E'_{ТВ}), \quad (1)$$

$$E_{РАС} = E_{ИСП} + \sum \Delta E, \quad (2)$$

$$E_{ИСП} = E'' = E''_{в.р.} + E_x'' = \eta E''_{тв} + E_r'' + E''_{тв}(1 - \eta) + E_x' + \Delta E_{пол}, \quad (3)$$

где $E_{РАС}$ - располагаемая эксергия; $E_{ИСП}$ - максимально используемая эксергия; $\sum \Delta E$ - необратимые эксергетические потери; η - коэффициент осаждения твердых частиц аппарата; $\Delta E_{пол}$ - полезно использованная эксергия.

Необратимые потери эксергии в процессе тепло- и массообмена вызваны согласно [1,2], с потерей тепла в окружающую среду (ΔE_0), потерей с гидравлическим сопротивлением ΔE_u и потерей, связанные теплопроводностью вдоль теплообменной поверхности аппарата ($\Delta E_{Т.ПР}$). Тогда необратимые эксергетические потери равны:

$$\sum \Delta E = \Delta E_0 + \Delta E_u + \Delta E_{Т.ПР}, \quad (4)$$

На эффективность работы аппарата влияют все вышеуказанные потери. Общие удельные эксергетические потери от

гидравлических сопротивлении можно вычислить, как сумму удельных эксергетических потерь от гидравлических сопротивлении горячего и холодного теплоносителя при прохождении через аппарат в виде:

$$e_p = e_{гр} + e_{хр} = T_0 R \ln \left(1 - \frac{\Delta P_x}{P_{x2}} \right) + T_0 R_{г.см} \ln \left(1 - \frac{\Delta P_r}{P_{r2}} \right), \quad (5)$$

где ΔP_x , ΔP_r - соответственно, гидравлические потери в аппарате по холодному теплоносителю; P_{x2} , P_{r2} - соответственно, давления холодного и горячего теплоносителя на выходе из аппарата.

Эксергетические потери от гидравлических сопротивлении для холодного и горячего теплоносителей рассчитываются с учетом конструктивных характеристик аппарата предварительно заданных теплофизических параметрах теплоносителей. Сначала определяют потери давления теплоносителей при прохождении через аппарат, а потом изменение энтропии после потери эксергии.

Общие удельные эксергетические потери связанные с потерей тепла в окружающую среду определяют по формуле:

$$\Delta e_{\infty} = q_0 t_{\infty} = q_0 \left(1 - \frac{T_0}{T_{cp}} \right), \quad (6)$$

где q_0 - удельный тепловой поток между аппаратом и с окружающей средой; t_{∞} - средняя эксергетическая температура, при которой происходит теплообмен между аппаратом и окружающей средой; $T_{cp} = (T_1 + T_2)/2$ - средняя температура теплоносителя.

Удельные эксергетические потери, связанные теплопроводностью вдоль поверхности теплообмена от теплой стороны к холодной, вычисляются по формуле:

$$e_{т.пр} = q_{т.пр} t'_{э.пов} = q_{т.пр} \left(1 - T_0 / T_{ср.пов} \right), \quad (7)$$

где $e_{т.пр}$ - удельный тепловой поток теплопроводности вдоль поверхности теплообмена; $t'_{э.пов}$ - средняя эксергетическая

температура вдоль поверхности теплообмена; $T_{\text{ср.пов}}$ - средняя температура теплообменной поверхности.

Удельный тепловой поток теплопроводности вычисляется по формуле Фурье:

$$q_{\text{т.пр}} = \frac{\lambda}{l} (t''_{\text{ср}} - t'_{\text{ср}}), \quad (8)$$

где λ - коэффициент теплопроводности теплообменной поверхности; l - длина поверхности; $t'_{\text{ср}}$, $t''_{\text{ср}}$ - соответственно, средние температуры теплоносителей с холодной и теплой стороны теплообменной поверхности.

В общем случае необратимые эксергетические потери рассчитываются, с учетом конструктивных характеристик аппарата, по уравнению Гюи-Стодолы в виде:

$$\Sigma \Delta E = T_0 \Sigma \Delta S, \quad (9)$$

где ΔS - приращение энтропии.

Термодинамическая эксергия однокомпонентного холодного потока согласно [1] вычисляется по уравнению:

при входе в аппарат

$$e'_x = C_p \int_{t_0}^{t_{x1}} (t_{x1} - t_0) - T_0 \left[C_p \int_{t_0}^{t_{x1}} \ln T_1/T_0 - R_x \ln P_1/P_0 \right], \quad (10)$$

при выходе из аппарата

$$e''_x = C_p \int_{t_0}^{t_{x2}} (t_{x2} - t_0) - T_0 \left[C_p \int_{t_0}^{t_{x2}} \ln T_2/T_0 - R_x \ln P_2/P_0 \right], \quad (11)$$

Термическая эксергия горячего потока, который состоит из газовой смеси и твердых частиц вычисляются по формуле:

при входе в аппарат

$$\begin{aligned}
 e'_{см} &= m_r e'_r + (1 - m_r) e'_{ТВ} = \\
 &= m_r \left\{ C_{рсм} \int_{t_0}^{t_{r1}} (t_{r1} - t_0) - T_0 \left[C_{рсм} \int_{t_0}^{t_{r1}} \ln T_r / T_0 - R_{см.г} \ln P_r / P_0 \right] \right\} + \\
 &+ (1 - m_r) \times \left[C_{ТВ} \int_{t_0}^{t_{ТВ1}} (t_{ТВ1} - t_0) - T_0 C_{ТВ} \int_{t_0}^{t_{ТВ1}} \ln T_{ТВ} / T_0 \right],
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

при выходе из аппарата

$$\begin{aligned}
 e''_{см} &= m_r e''_r + (1 - m_r) e''_{ТВ} = \\
 &= m_r \left\{ C_{рсм} \int_{t_0}^{t_{r2}} (t_{r2} - t_0) - T_0 \left[C_{рсм} \int_{t_0}^{t_{r2}} \ln T_r / T_0 - R_{см.г} \ln P_r / P_0 \right] \right\} + \\
 &+ (1 - m_r) (1 - \eta) \times \left[C_{ТВ} \int_{t_0}^{t_{ТВ2}} (t_{ТВ2} - t_0) - T_0 C_{ТВ} \int_{t_0}^{t_{ТВ2}} \ln T_{ТВ} / T_0 \right],
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Термическая эксергия осажденных твердых частиц:

$$\begin{aligned}
 (1 - m_r) \eta e''_{ТВ} &= (1 - m_r) \eta \times \\
 &\times \left[C_{ТВ} \int_{t_0}^{t_{ТВ2}} (t_{ТВ2} - t_0) - T_0 C_{ТВ} \int_{t_0}^{t_{ТВ2}} \ln T_{ТВ} / T_0 \right],
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Здесь C_p , $C_{рсм}$, $C_{ТВ}$ - средние массовые изобарные теплоемкости однокомпонентного потока, смеси газов и твердых частиц; R_x , $R_{см.г}$ - газовые постоянные холодного потока и смеси газов; T_0 , P_0 - соответственно, температура и давление отсчета; m_r - массовая доля газовой смеси в горячем потоке. Индексы "1", "2"

относятся к параметрам потока при входе и при выходе.

Одним из главных показателей эффективности тепловых процессов является термодинамический КПД, определяемый как отношение максимально используемой эксергии к располагаемой [1]:

$$\eta_c = \frac{E_{исп}}{E_{расп}} = 1 - \frac{\sum \Delta E}{E}, \quad (15)$$

В общем случае эксергетический КПД аппарата рассчитывается по соотношению

$$\eta_e = \frac{\Delta E_{max}}{E} = 1 - \frac{(\sum \Delta E + E_{r,p}^*)}{E}, \quad (16)$$

Конкретно эксергетический КПД равен:

$$\eta_e = \frac{(E_x^* - E_x^*)}{(E_x^* + (E_r^* + E_{rp}^*))}, \quad (17)$$

Формулой (16) целесообразно пользоваться, когда необходимо оценить энергетические характеристики проектируемого тепло- и массообменного аппарата, а формулой (17) - когда необходимо оценить энергетические характеристики существующего аппарата при известных параметрах теплоносителей.

В таблице приведены результаты расчета эксергетических показателей эффективности работы тепло- и массообменного аппарата вихревого типа. Здесь горячим теплоносителем является продукты сгорания Экибастузского угля с параметрами $t_{u1} = 420$ °С, $t_{k2} = 180$ °С; концентрация твердых частиц $Z = 57$ г/м³; холодный теплоноситель - воздух с параметрами $t_{c1} = 20$ °С, $t_{c2} = 120$ °С; относительная влажность $\varphi = 50$ %; температура окружающей среды $t_0 = 20$ °С; барометрическое давление $B = 745$ мм рт. ст.

Таблица 1

№	Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Значение
1	Состав продуктов горения Экибастузского угля:			
	- трехатомные газы	V^0RO_2	m^3/Γ	0,81
	- азот	V^0N_2	m^3/Γ	3,5
	-водяной пар	V^0H_2O	m^3/Γ	0,48
	-воздух	$v^0(1-a)$	m^3/Γ	1,06
	-полный объем газов	V^0_r	m^3/Γ	5,851
2	Температура входа			
	-воздуха	$t_{в1}$	$^{\circ}C$	20
	- дымовых газов	$t_{г1}$	$^{\circ}C$	420
3	Температура			
	- воздуха	$t_{в2}$	$^{\circ}C$	
	- дымовых газов	$t_{г2}$	$^{\circ}C$	
4	Расходы			
	- воздуха	G_B	$кг/с$	
	- дымовых газов	G_r	$кг/с$	2,495
5	Концентрация золы	Z	$г/м^3$	57
6	Степень пылеулавливания аппарата	η	-	0,92
7	Эксергия входа			
	- воздуха	E_B	$кВт$	0
	- газовой смеси	$E_{г.см}$	$кВт$	358,7
8	Эксергия выхода			
	- воздуха	E_B	$кВт$	199,745
	- газ + твердые частицы	$E_{г.тв}$	$кВт$	75,352
	- осажд. твердые частицы	$E_{тв}$	$кВт$	0,0737
9	Нсобрратимые потери эксергии	$\Sigma \Delta E$	$кВт$	83,67
10	КПД			
	- термодинамическое		%	76,7
	- эксергическое		%	70,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1974. - 256 с.
2. Сажин Б. С., Булеков А. П. Эксергетический метод в химической технологии. М.: Химия, 1992. - 205 с.

Таразский государственный университет им. М. Х. Дулати

ЦИКЛОНДЫ ШАҢ ҰСТАЙТЫН АППАРАТТЫҢ ТИІМДІ ЖҰМЫС ІСТЕУІНІҢ ЭКСЕРГЕТИКАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІ

Техн.ғыл.докторы	У.Қ.Бишімбаев
Техн.ғыл.канд.	Т.О.Омарбеков
Техн.ғыл.канд.	И.С.Тілегенов

Шаң ұстайтын циклонды аппараттың өрі жылу алмастыру ретінде пайдаланғандағы тиімді жұмыс істеуінің эксергетикалық көрсеткіштері қарастырылған. Аппараттың қарама қарсы оралымды ағыстарының жылудық және эксергетикалық баланстары қарастырылған. Жылу алмасу және шаң ұстау процестерінің жылу динамикасы мен эксергетикалық пайдалы өсер ету коэффициентін (ПӨЕК) есептеу тәсілі келтірілген. Екібастұз көмірін жағу нәтижесімен жылу және салмақалмасу аппаратының тиімді жұмыс істеу көрсеткіштері келтірілген.