

УДК 532.529

ПРИЕМОВ С.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины

К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В МЕХАНИЧЕСКИХ СКРУББЕРАХ

Запропоновано інженерний метод розрахунку процесів тепло- і масообміну у механічних скрубберах, використання якого дозволяє розраховувати кінцеві параметри газу за відомими початковими параметрами та витратами взаємодіючих середовищ.

Предложен инженерный метод расчета процессов тепло- и массообмена в механических скрубберах, использование которого позволяет рассчитывать конечные параметры газа по известным начальным параметрам и расходам взаимодействующих сред.

An engineering method for numerical analysis of heat and mass transfer processes in mechanical scrubbers is proposed. This method enables one to calculate the final gas parameters by the known initial parameters and flow rates of interacting media.

c – удельная теплоемкость;
 d – абсолютное влагосодержание газа;
 G_r – количество обрабатываемого газа;
 I – энтальпия газа;
 K_t – величина энергии соприкосновения;
 m – величина удельного орошения;
 $N_{уд}$ – удельный расход энергии на распыление 1 м³ жидкости;
 $Q_{полн}$ – полный тепловой поток от одной фазы к другой;
 $Q_{явн}$ – тепловой поток от одной фазы к другой за счет явного теплообмена;
 $Q_{скр}$ – тепловой поток от одной фазы к другой за счет скрытого теплообмена;
 r – скрытая теплота парообразования;
 R – радиус распылителя жидкости;
 t – температура;
 V_r – скорость газа в зоне контакта с орошающей жидкостью;
 ω – угловая скорость распылителя жидкости;
 ΔP – гидравлическое сопротивление скруббера (без учета сопротивления каплеуловителя);

$\Delta t_{0м}$ – максимальный возможный температурный напор;
 $\Delta t_{тм}$ – средний арифметический температурный напор;
 Δt – коэффициент интенсивности теплообмена;
 Δd_0 – максимальный возможный концентрационный напор.

Индексы верхние:

p – расчет;
 $э$ – эксперимент.

Индексы нижние:

$г$ – газ;
 $ж$ – жидкость;
 $м$ – мокрый термометр;
 $п$ – пар;
 $полн$ – полный;
 $скр$ – скрытый;
 $уд$ – удельный;
 $явн$ – явный;
 1 – параметры на входе;
 2 – параметры на выходе.

При осуществлении непосредственного контакта капель распыленной жидкости с газами в мокрых пылеуловителях большое значение имеет возможность определения конечных параметров охлаждаемого газа – температуры, теплосодержания и влагосодержания. Это связано, например, в ряде случаев с ограничениями по степени охлаждения газов

или с необходимостью количественного учета величины испарившейся (сконденсированной) влаги при осуществлении скрубберных процессов пылеулавливания – соответственно в испарительном или в конденсационном режимах улавливания пыли.

Во многих случаях известны начальные (входные) параметры взаимодействующих сред, их

расходы и требуется определить конечные параметры газа и жидкости.

Цель настоящей работы – решение именно этой задачи применительно к условиям обработки газов в механических скрубберах.

Как известно [1], общий тепловой поток в скрубберах от одной фазы к другой состоит из явной и скрытой теплоты (при условии пренебрежения весьма малой долей теплоты, передаваемой естественным конвективным потоком):

$$Q_{\text{полн}} = Q_{\text{явн}} + Q_{\text{скр}}; \quad (1)$$

$$Q_{\text{полн}} = G_{\text{г}}(I_1 - I_2); \quad (2)$$

$$Q_{\text{явн}} = G_{\text{г}}c_{\text{г}}(t_{1\text{г}} - t_{2\text{г}}); \quad (3)$$

$$Q_{\text{скр}} = G_{\text{г}} [r(d_1 - d_2) + (t_{1\text{г}}d_1 - t_{2\text{г}}d_2)]. \quad (4)$$

Для установления зависимости $Q_{\text{явн}}$ от определяющих факторов на стенде [2] проведена серия опытов с помощью метода статистического планирования и обработки результатов эксперимента – центрального композиционного ортогонального плана [3].

Следует отметить, что введение соотношения $(Q_{\text{явн}}/G_{\text{г}})$ позволяет отказаться от необходимости оценки влияния величины поверхности теплообмена, которая не поддается измерению и расчету [4].

В табл. 1 приведены данные по исследованию зависимости $Q_{\text{явн}}/G_{\text{г}} = f(V_{\text{г}}, m, t_{1\text{г}})$ при $\omega R = 19 = \text{const}$, полученные в результате реализации плана эксперимента по центральному композиционному ортогональному плану.

Значения коэффициентов регрессии вычислялись по зависимостям, рекомендованным в рабо-

те [3]. В результате обработки данных исследований получена следующая зависимость:

$$Q_{\text{явн}}/G_{\text{г}} = 10 - 2,64 m + 0,544 t_{1\text{г}} - 2,55 V_{\text{г}} + 0,63 V_{\text{г}} m - 0,0084 V_{\text{г}} t_{1\text{г}} + 0,071 V_{\text{г}}^2, \text{ кДж/кг.} \quad (5)$$

Среднее отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышает 1,5%.

Для оценки влияния на величину $(Q_{\text{явн}}/G_{\text{г}})$ значений параметров $\omega R, t_{1\text{ж}}$ были проведены специальные уточняющие серии опытов в лабораторных и промышленных условиях на установках производительностью по очищаемому газу до $3 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{ч}$, в результате обработки которых получена следующая зависимость:

$$Q_{\text{явн}}/G_{\text{г}} = (10 - 2,64 m + 0,544 t_{1\text{г}} - 2,55 V_{\text{г}} + 0,63 V_{\text{г}} m - 0,0084 V_{\text{г}} t_{1\text{г}} + 0,071 V_{\text{г}}^2)(\omega R/19)^{0,3} \quad (6)$$

(для $t_{1\text{ж}} < t_{1\text{м}}$).

Для $V_{\text{г}} < 20 \text{ м/с}$ необходимо в зависимости (6) принимать $V_{\text{г}} = 20 \text{ м/с}$, поскольку в этом диапазоне скоростей газа величина $Q_{\text{явн}}/G_{\text{г}} = \text{const}$ и равна величине $Q_{\text{явн}}/G_{\text{г}}$ для $V_{\text{г}} = 20 \text{ м/с}$. Физически это объясняется тем, что в этом диапазоне скоростей газа на эффективность тепло- и массообмена определяющее значение оказывает не величина $V_{\text{г}}$, а величина ωR .

Если, по аналогии с описанием эффективности пылеулавливания [5], использовать величину $K_{\text{т}}$, то можно записать окончательную зависимость в виде:

$$Q_{\text{явн}}/G_{\text{г}} = (1,36 + 0,14 t_{1\text{г}} - 1,46 \cdot 10^{-2} K_{\text{т}} - 3 \cdot 10^{-6} K_{\text{т}} t_{1\text{г}} - 3 \cdot 10^{-4} t_{1\text{г}}^2 + 10^{-5} K_{\text{т}}^2)(\omega R/19)^{0,3} \quad (7)$$

(для $t_{1\text{ж}} < t_{1\text{м}}$).

Табл. 1. Зависимость интенсивности явного теплообмена от определяющих факторов

$V_{\text{г}}, \text{ м/с}$	28	28	28	28	12	12	12	12	20	20	20	30
$m, \text{ кг/м}^3$	0,55	0,35	0,55	0,35	0,55	0,35	0,55	0,35	0,57	0,33	0,45	0,45
$t_{1\text{г}}, \text{ }^\circ\text{C}$	93	93	57	57	93	93	57	57	75	75	97	75
$t_{2\text{г}}, \text{ }^\circ\text{C}$	61	65	37	39	60	60	40	41	54	56	70	49
$(Q_{\text{явн}}/G_{\text{г}})^{\text{э}}, \text{ кДж/кг}$	32	28,6	20	18,1	33,1	32,6	17,1	16,1	21,6	18,4	27,2	26,1
$(Q_{\text{явн}}/G_{\text{г}})^{\text{р}}, \text{ кДж/кг}$	31,7	28,7	20,7	17,8	33,1	32,2	17,2	16,3	21	18,7	28	27,2

Табл. 2. Сравнение рассчитанных по зависимости (10) и экспериментальных данных по оценке величины “ t_{2r} ”

$t_{1ж}$, °C	$(t_{2r})^э$, °C	$(t_{2r})^п$, °C
55	60,6	61,4
60	67,4	66,4
65	71,2	71,4
70	75	76,4

При этом величина энергии соприкосновения K_T рассчитывается по зависимости:

$$K_T = (\Delta P + N_{уд} m), \text{ кДж/1000 м}^3. \quad (8)$$

Конечная температура газа определится по зависимости:

$$t_{2r} = t_{1r} - (Q_{явн}/G_r)/c_r \quad (\text{для } t_{1ж} < t_{1м}); \quad (9)$$

для условий орошения “горячей” водой (при $t_{1ж} > t_{1м}$) и обычной для работы механических скрубберов плотности орошения $(10...20)\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ конечная температура газа определится по следующей экспериментально полученной зависимости:

$$t_{2r} = t_{1r} - (Q_{явн}/G_r)/c_r + (t_{1ж} - t_{1м}) \quad (\text{для } t_{1ж} > t_{1м}). \quad (10)$$

В табл. 2 приведены рассчитанные по зависимости (10) и экспериментальные данные по оценке величины “ t_{2r} ” (для условий $t_{1r} = 90$ °C; $t_{1м} = 54$ °C; $\omega R = V_r = 25$; $m = 0,5$).

Использование полученных выше зависимостей позволяет рассчитывать конечные параметры газа после механических скрубберов в следующей последовательности:

- задаются начальные параметры газа (t_{1r}, d_1) и жидкости ($t_{1ж}$) на входе в аппарат и их расходы;
- определяются недостающие начальные и расчетные параметры:

$$I_1 = (r + c_{п} t_{1r}) d_1 + c_r t_{1r}; \quad (11)$$

$$t_{1м} = 11 I_1^{0,27}, \quad (12)$$

где величина коэффициента “11” уточнена автором по данным работы [6] для диапазона $t_{1r} < 250$ °C и размерности величины I_1 в кДж/кг;

$$d_{1м} = 0,004564 \exp(0,059 t_{1м}). \quad (13)$$

Конечная температура газа (t_{2r}) рассчитывается по зависимостям (6–10).

Конечная температура газа ($t_{2м}$) рассчитывается по формуле:

$$t_{2м} = t_{1ж} + 0,54 (t_{1м} - t_{1ж}) \left(\frac{38}{\omega R}\right)^{0,7} \quad (\text{для } t_{1ж} < t_{1м}). \quad (14)$$

Для адиабатного режима (при $t_{1ж} = t_{1м}$) имеем следующие равенства:

$$t_{2м} = t_{1ж} = t_{1м} = t_{2ж}, \quad (15)$$

и поэтому возникает неопределенность типа $\Delta t = 0/0$, которая не раскрывается с помощью правила Лопитала; в этом случае следует использовать метод итераций, задаваясь несколькими значениями “ $t_{1ж}$ ” (из диапазона температур, меньших $t_{1м}$), и определить значение Δ , как предел при стремлении политропных процессов к адиабатному [7].

После оценки величины “ $t_{2м}$ ” по зависимостям (14) или (15) определяются величины “ $d_{2м}$ ” и “ $I_{2м}$ ” по следующим формулам:

$$d_{2м} = 0,004564 \exp(0,059 t_{2м}); \quad (16)$$

$$I_2 = I_{2м} = (r + c_{п} t_{2м}) d_{2м} + c_r t_{2м}. \quad (17)$$

По величине “ I_2 ” рассчитываем уточненное значение “ d_2 ” по зависимости:

$$d_2 = \frac{I_2 - t_{2r} c_r}{r + c_{п} t_{2r}}. \quad (18)$$

Для расчета массообмена также предварительно определяются величины, необходимые для

Табл. 3. Данные промышленных испытаний механических скрубберов

Тип скруббера	$t_{1г},$ °С	$d_{1г},$ кг/кг	$t_{2г},$ °С	$V_{г},$ м/с	$m,$ кг/кг	$\omega R,$ м/с	$t_{1ж},$ °С	$t_{2ж},$ °С
МПВ-80	90	0,1053	66	22	0,232	25	43	45
МПВ-100	95	0,0822	59	5,0	0,465	38	45	50

Табл. 4. Данные расчетов эффективности теплообмена в механических скрубберах

Тип скруббера	$Q_{явн}/G,$ кДж/кг	$t_{2г},$ °С	$I_1,$ кДж/кг	$d_{1м},$ кг/кг	$t_{2м},$ °С	$d_2,$ кг/кг	$I_{2м},$ кДж/кг	$Q_{скр}/G,$ кДж/кг	$Q_{п}/G,$ кДж/кг	$\Delta Q,$ %
МПВ-80	25,17	64,8	371	0,112	51,73	0,089	302,5	43,17	68,34	4,55
МПВ-100	34,13	60,8	315	0,098	48,8	0,076	259,3	19,1	55,73	4,5

Примечание: при расчете $Q_{явн}/G$ для МПВ-100 величина $V_{г}$ принималась равной 20 м/с, как это было отмечено ранее в примечании к зависимости (6).

расчетов по уравнению относительной интенсивности тепло- и массообмена [7]:

$$\Delta t_{0М} = t_{1М} - t_{1ж}; \quad (19)$$

$$\Delta t_{ТМ} = (t_{1М} + t_{2М})/2 - (t_{1ж} + t_{2ж})/2; \quad (20)$$

$$\Delta t = \Delta t_{М}/\Delta t_{0М}; \quad (21)$$

$$\Delta d_0 = d_{1М} - d_1; \quad (22)$$

$$d_2 = d_{2М} - \Delta d_0(2\Delta t - 1) \quad (23)$$

(если $\Delta t < 0,5$, то $d_2 = d_2 м$).

Количество массы пара, переданной от одной среды к другой, составит:

$$G_{п} = G_{г}(d_2 - d_1). \quad (24)$$

После определения величины $Q_{скр}/G_{г}$ по формуле (4), а величины $Q_{полн}/G_{г}$ — по зависимости (2), определяем величину невязки теплового баланса (%) по формуле:

$$\Delta Q = \frac{|Q_{явн}| + |Q_{скр}| - |Q_{полн}|}{|Q_{полн}|} 100\% . \quad (25)$$

На этом расчет полного теплообмена и массообмена заканчивается, так как определены поток переданной теплоты, конечные параметры газа и жидкости.

Точность расчетов по приведенной методике удовлетворительная, поскольку невязка теплового баланса при расчетах обычно не превышает 10%.

В качестве примера применения приведенного метода расчета процессов тепло- и массообмена в механических скрубберах покажем (для условий очистки отработанного сушильного агента от двух крупнотоннажных распылительных сушилок типа СРЦ 10/550 НК в производстве сухих кормовых дрожжей) сопоставление экспериментальных и расчетных данных показателей тепло- и массообмена в механических скрубберах типа МПВ-80 (Лужанский экспериментальный завод) и МПВ-100 (Косарский спиртзавод) — соответственно производительностью по очищаемому газу 80 и 100 тыс. м³/ч.

В табл. 3 приведены экспериментальные данные промышленных испытаний (по актам внедрения [8]) механических скрубберов типа МПВ-80 и МП-100, а в табл. 4 приведены данные расчетов эффективности теплообмена (по приведенной выше методике) в механических скрубберах типа МПВ-80 и МПВ-100.

Из данных табл. 4 видно, что результаты расчетов тепло- и массообмена по приведенной методике удовлетворительно описывают экспериментальные данные, поскольку невязка теплового баланса составляет всего 4,5%, т.е. ниже уровня невязки теплового баланса 10%, рекомендуемого при расчетах теплообменного оборудования.

Выводы

Предложен инженерный метод расчета процессов тепло- и массообмена в механических скрубберах, использование которого позволяет по известным начальным параметрам и расходам взаимодействующих сред рассчитывать конечные параметры газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нестеренко А.В.* Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Высшая школа, 1971. — 460 с.
2. *Приемов С.И., Дубчак М.З.* Расчетная модель эффективности теплообмена в скруббере Вентури при охлаждении ненасыщенного парама воздуха // Строительные материалы, изделия и санитарная техника. — К.: Будівельник. — 1981. — Вып. 4. — С.80–84.
3. *Бондарь А.Г., Статюха Г.А.* Планирование эксперимента в химической технологии. — К.: Вища школа, 1976. — 184 с.

4. *Дубинская Ф.Е.* Некоторые вопросы теплообмена в скрубберах Вентури при охлаждении ненасыщенных парама газов // Промышленная и санитарная очистка газов. НТРС. — 1975. — № 2. — С. 2–8.

5. *Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Тарат Е.Я.* Технология пылеулавливания. — М.: Машиностроение, 1985. — 192 с.

6. *Савицкая Н.М., Вальдберг А.Ю., Ларина Т.В.* Приближенный расчет температуры мокрого термометра // Промышленная и санитарная очистка газов. НТРС. — 1980. — № 2. — С. 6.

7. *Андреев Е.И.* Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. — Л.: Энергоатомиздат, 1985. — 192 с.

8. *Таньковский Р.Ю.* Разработка способа улавливания пыли кормовых дрожжей с целью снижения потерь при сушке распылением и защиты окружающей среды. Дисс. ... канд. техн. наук: — К., 1984, — 166 с.

Получено 30.03.2009 г.

УДК621.928.9

СЕРЕБРЯНСКИЙ Д.А.¹, НОВАКОВСКИЙ Е.В.²

¹*Институт технической теплофизики НАН Украины*

²*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”*

ОЧИСТКА ГАЗОВ ОТ ПЫЛИ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФИЛЬТРАХ

У статті наведено результати випробувань відцентрових фільтрів при вловлюванні графітового та коксового пилу. Ефективність очищення газів від пилу у відцентрових фільтрах на порядок більша, ніж у циклонах.

В статье приведены результаты испытаний центробежных фильтров при улавливании графитовой и коксовой пыли. Эффективность очистки газов от пыли в центробежных фильтрах на порядок больше, чем в циклонах.

The results of tests of centrifugal filters in catching graphite and coke dust are presented. The efficiency of cleaning of gases from dust in centrifugal filters is by an order of magnitude than higher in cyclones.

d_q — диаметр частицы;

n — количество каналов в центробежном фильтре;

t — температура газа;

ε — коэффициент уноса;

η — коэффициент улавливания.