

УДК 66.048

## СЕПАРАЦИОННАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АППАРАТОВ ГАЗООЧИСТКИ

А.Г. ЛАПТЕВ, д-р техн. наук, Р.М. МИНИГУЛОВ, канд. техн. наук, М.М. ТАРАСКИН, соиск.

Рассмотрены выражения для определения эффективности очистки газов от дисперсной фазы. Для выбора наиболее рациональной конструкции газосепаратора записаны фактор интенсивности использования аппарата и энергетический коэффициент. Представлены выражения для расчета эффективности насадочных и вихревых газосепараторов. Сделаны выводы о наиболее эффективных конструкциях.

*Ключевые слова:* расчет эффективности сепарации дисперсной фазы, снижение брызгоуноса, правило аддитивности эффективностей, фактор интенсивности аппарата.

## SEPARATION AND ENERGY EFFICIENCY OF GAS PURIFICATION APPARATUSES

A.G. LAPTEV, Doctor of Engineering, R.M. MINIGULOV, Candidate of Engineering, M.M. TARASKIN, Applicant

The authors consider the expressions to determine the effectiveness of gases purification from the dispersed phase. To select the most rational design of gas separator the authors record the intensity factor of using the device and power efficiency. Expressions for calculating the efficiency of the packed and vortex gas separators are presented. The conclusions about the most effective constructions are made.

*Key words:* calculating the effectiveness separation of dispersed phase, decreasing the drop entrainment, the rule to additivity of efficiency, the intensity factor of the device.

При работе различных энергетических установок и тепломассообменных аппаратов часто наблюдается брызгоунос капель жидкости, что негативно сказывается на эффективности проводимых процессов. Актуальной задачей является очистка природных газов от капельной влаги и механических загрязнений.

Для снижения брызгоуноса в аппаратах и очистки газов от дисперсной среды перед подачей в трубопроводы используют различные технические решения, например такие, как установка сетчатых демистеров, жалюзийных каплеотбойников, сепарационных насадок, вихревых контактных устройств и т.д.

Основной задачей при выборе конструкций газосепарирующих устройств для заданных условий проведения процесса является достоверный расчет эффективности сепарации дисперсной фазы. Сепарационная эффективность может быть определена по содержанию дисперсной фазы в газах до поступления в газоочистный аппарат и на выходе из него по выражению

$$\eta = \frac{G_H - G_K}{G_H} = \frac{V_H X_H - V_K X_H}{V_H X_H} = 1 - \frac{V_K X_K}{V_H X_H}, \quad (1)$$

где  $G$  – массовый расход дисперсной фазы (капель, тумана, пыли), содержащейся в газах, кг/с;  $V$  – объемный расход газов, м<sup>3</sup>/с;  $X$  – концентрация частиц в газах, кг/м<sup>3</sup>; нижние индексы «Н» – начальное и «К» – конечные значения. Обычно для аппаратов принимается  $V_H = V_K$ .

Как известно, существуют гравитационные, инерционные, центробежные и другие механизмы осаждения частиц. Работа большинства промышленных аппаратов основана на совмещении различных принципов осажде-

ния. Соответственно, эффективность сепарации зависит от различных параметров.

При одновременном действии нескольких механизмов общая эффективность записывается по правилу аддитивности эффективностей

$$\eta_{\Sigma} = 1 - \prod_i (1 - \eta_i), \quad (2)$$

где  $\eta_i$  – эффективность сепарации за счет  $i$ -го механизма.

Кроме эффективности газоочистки важное значение имеют фактор интенсивности аппарата и энергетические затраты.

Фактор интенсивности использования аппарата газоочистки можно оценить по выражению

$$i = \frac{M}{V_{ап}} = \frac{G_H - G_K}{V_{ап}}, \quad (3)$$

где  $M$  – масса частиц, оседающих в аппарате за единицу времени, кг/с;  $V_{ап}$  – объем аппарата, м<sup>3</sup>.

Фактор (3) можно записать, используя КПД очистки. Из (1) и (3) получим

$$i = \frac{\eta G_H}{V_{ап}} = \frac{\eta V_H X_H}{V_{ап}}. \quad (4)$$

В теплотехнике для оценки энергетической эффективности теплообменников используются энергетический коэффициент  $E = Q / N$ , где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $N$  – мощность на прокачку теплоносителя, Вт. По аналогии, для аппарата газоочистки можно записать

$$E = \frac{M}{N} = \frac{G_H - G_K}{\Delta p V_H} = \frac{X_H - X_K}{\Delta p V_H}, \quad (5)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления газа в аппарате, Па.

Из (1) и (5) следует

$$E = \frac{\eta X_H}{\Delta p V_H}. \quad (6)$$

Выражением (5) можно пользоваться при оценке энергетической эффективности как действующих газосепараторов, так и проектируемых.

Оценку эффективности аппаратов газочистки желательнее выполнять по максимальным значениям как фактора  $i$  (3), так и коэффициента  $E$  (6).

При проектировании аппаратов очистки газов начальная концентрация  $X_H$  и расход газа  $V_H$  задаются в техническом задании (ТЗ). Для различных конструкций аппаратов для заданных условий в ТЗ отношение начальных параметров будет одинаковым, т.е.  $X_H / V_H = \text{const}$ . Тогда энергетический коэффициент примет вид

$$E' = \frac{\eta}{\Delta p}. \quad (7)$$

По наибольшему значению  $E'$  (7) для идентичных начальных условий по ТЗ выбирается более эффективная конструкция аппарата, при условии, что конечная концентрация  $X_K$  удовлетворяет требованиям ТЗ.

Учитывая, что при выполнении требований ТЗ по  $X_H$  и  $X_K$  КПД  $\eta$  для всех аппаратов получится равным. Тогда выбор аппарата можно выполнить по наименьшим значениям  $\Delta p$  и  $V_{ан}$ . Выполнение этих условий обеспечит меньшие затраты энергии на подачу газа в аппарат, меньшие габариты и металлоемкость конструкции.

Следует отметить, что эффективность газоочистки (как и теплообменных процессов) часто связывают с гидравлическим сопротивлением рабочей зоны аппарата (т.е. за исключением местных сопротивлений). Такой подход получил название «энергетический метод определения эффективности газосепараторов». По аналогии с процессами тепло- и массообмена степень очистки в энергетическом методе связывают с числом единиц переноса  $h$ :

$$\eta = 1 - \exp(-h). \quad (8)$$

Зависимость  $h$  связывают с удельными энергозатратами  $A$  (Дж/м<sup>3</sup>) на осаждение (улавливание) дисперсной фазы:

$$h = VA^K, \quad (9)$$

где  $V$  и  $K$  – эмпирические константы, определяемые дисперсным составом очищаемых газов.

В работе [1] установлена приближенная связь

$$h \approx \frac{\rho_r \gamma F}{G}, \quad (10)$$

где  $\rho_r$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $F$  – площадь рабочей поверхности контактного элемента, м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – коэффициент переноса импульса (импульсоотдачи), м/с.

В результате для частиц субмикронного размера для аппарата с регулярной сепарирующей насадкой получено [1]

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\Delta P_{тр} S}{G(u_{cp} \pm u_{гр})}\right), \quad (11)$$

где  $\Delta P_{тр}$  – перепад давления, вызванный трением, Па;  $S$  – площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>;  $u_{cp}$  – средняя скорость газа в канале, м/с;  $u_{гр}$  – скорость на межфазной поверхности стекающей пленки жидкости при сепарации капель, м/с.

Кроме энергетического метода известны различные теоретические модели турбулентного осаждения частиц на стенку (или пленку жидкости) каналов.

В зависимости от принятого основного механизма, эти модели подразделяются на пять групп:

1) свободно-инерционные, в основу которых положена концепция свободного инерционного выброса частиц из пристенных турбулентных вихрей;

2) конвективно-инерционные, которые связывают процесс осаждения с инерционными эффектами при вторжении крупномасштабных вихрей в пограничный слой;

3) подъемно-миграционные, связывающие осаждение с их подъемной миграцией и инертностью;

4) эффективно-диффузионные, исходящие из предположения, что в пристенной области коэффициент турбулентной диффузии частиц выше, чем газа за счет инертности;

5) турбулентно-миграционные, в которых учитывается турбулентная миграция частиц к стенке канала как следствие градиента амплитуды пульсационной поперечной составляющей скорости газа.

В работе [1] на основе использования теории турбулентной миграции аэрозольных частиц и вероятностно-стохастической модели получены выражения для расчета эффективности сепарации.

Для насадочных газосепараторов

$$\eta_t = 1 - \exp\left[-1,40 \cdot 10^{-4} \frac{d_c^4 \rho_c^2 \Delta P^{1,25}}{\nu_r^{2,75} \rho_r^{3,25} d_s} \left(\frac{u_{cp}}{L}\right)^{0,25}\right], \quad (12)$$

где  $d_c$  – диаметр частицы, м;  $\rho_r$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu_r$  – кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_c$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $d_s$  – эквивалентный диаметр канала насадки, м;  $\Delta P$  – перепад давления насадочной части аппарата, Па;  $u_{cp}$  – скорость газа в насадке, м/с;  $L$  – высота слоя насадки, м.

Уравнение (12) получено для мелких частиц при безразмерном времени релаксации  $\tau^+ < 10$ :

$$\tau^+ = \frac{\tau_p u_*^2}{\nu_r} \quad \text{и} \quad \tau_p = \frac{d_c^2 \rho_c}{18 \rho_r \nu_r},$$

где  $u_*$  – динамическая скорость трения, м/с;

$\tau_p$  – время релаксации, с.

Для аналогичных условий выражение для расчета эффективности контактных устройств с закруткой потока получено в виде [2]

$$\eta_t = 1 - \exp \left[ -1,3 \cdot 10^{-3} \frac{L}{d_3 u_{cp}} \left( \frac{\Delta p \cdot s}{\rho_r F \cos \theta} \right)^{2,5} \left( \frac{d_4^2 \rho_4}{18 v_r^2 \rho_r} \right)^2 \right], \quad (13)$$

где  $\theta$  – угол закрутки газового потока;  $F$  – площадь контакта газа с дисперсной фазой со стенками вихревого элемента,  $m^2$ ;  $L$  – длина пути прохождения газа в канале,  $m$ .

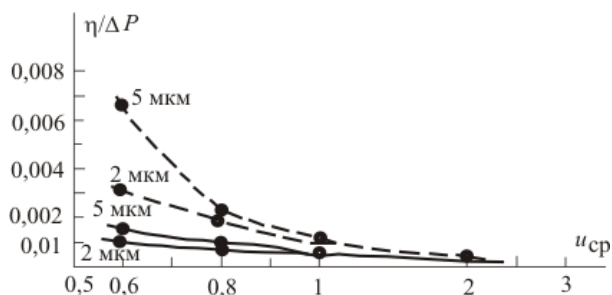


Рис. 1. Зависимость энергетического фактора (7) от фиктивной скорости газа в насадочном газосепараторе: — — — «Инжехим-2000»; ————— Кольца Рашига

Выполнены расчеты эффективности очистки газов (12), (13) и энергетического комплекса (7) вихревых и насадочных газосепараторов. На рис. 1 показана зависимость энергетического коэффициента (7) от скорости газа для газосепараторов с кольцами Рашига и насадкой «Инжехим» при улавливании дисперсных частиц с размерами 2 или 5 мкм. На рис. 2 показана зависимость эффективности насадочного и вихревого сепараторов от длины канала. Установлено, что наилучшие результаты обеспечивают аппараты с сепарационными насадками «Инжехим» [3] и комбинированные

насадочно-вихревые сепараторы [4]. Данные сепараторы внедрены на установках комплексной очистки природного газа в районах Крайнего Севера и дают положительные результаты.

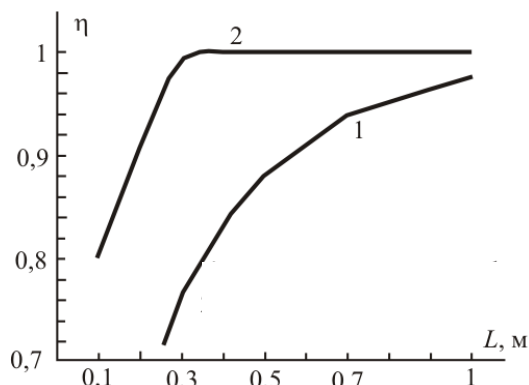


Рис. 2. Зависимость эффективности сепарации капель воды от длины канала (рабочая среда – воздух,  $u_{cp} = 2$  м/с,  $L = 0,1-1$  м,  $d_3 = 0,015$  м): 1 – закрученное движение фаз; 2 – движение потока в насадках

#### Список литературы

1. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Разделение гетерогенных систем в насадочных аппаратах. – Казань: Изд-во Казан. гос. энерг. ун-та, 2006.
2. Лаптев А.Г., Минигулов Р.М., Тараскин М.М. Математическая модель очистки газов от дисперсной среды вихревыми элементами: ММТТ-23 сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф. Т.4. Секция 4. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2010. – С. 57–59.
3. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация теплообменников установок в нефтехимии. – Казань: Изд-во Казан. гос. энерг. ун-та, 2010.
4. Минигулов Р.М., Фарахов М.И., Тараскин М.М. Очистка газов от жидкой дисперсной фазы комбинированным сепаратором // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3–4. – С. 3–7.

Лаптев Анатолий Григорьевич,  
Казанский государственный энергетический университет,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии воды и топлива на ТЭС и АЭС,  
адрес: г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, КГЭУ, каф. ТВТ,  
тел./факс (843) 519-42-54,  
e-mail: juliet-zls@yandex.ru

Минигулов Рафаэль Минигулович,  
ООО «НОВАТЭК»,  
кандидат технических наук, директор департамента по переработке нефти и газа,  
e-mail: juliet-zls@yandex.ru

Тараскин Михаил Михайлович,  
Казанский государственный энергетический университет,  
соискатель,  
адрес: г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, КГЭУ, каф. ТВТ,  
тел./факс (843) 519-42-54,  
e-mail: juliet-zls@yandex.ru