

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ БАРБОТАЖНЫХ СКРУББЕРАХ

HEAT TRANSFER IN ROTATING BUBBLE SCRUBBERS

П.А. ГОРШЕНИН

P.A. GORSHENIN

(Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского)
(Moscow State University of Technologies and Management named after K.G. Razumovsky)

E-mail: kmariya88@mail.ru

В статье приводятся результаты исследования процессов гидродинамики и теплообмена во вращающихся скрубберах барботажного типа (газ-жидкость). Предложена методика расчета процессов тепло- и массообмена такого скруббера.

The results of research of hydrodynamics and heat exchange processes in rotating scrubbers of bubble type (gas-liquid) are presented in the article. The design procedure of heat and mass exchange processes of such scrubber has been offered herein.

Ключевые слова: вращающийся барботажный скруббер, теплообмен, массообмен, интенсификация, двухфазный поток.

Keywords: a rotating bubble scrubber, heat exchange, mass exchange, intensification, two-phase flow.

Одним из важнейших направлений совершенствования технологических процессов является повышение их энергетической и экологической эффективности путем снижения сырьевых потерь и реализации возможных резервов экономии тепловой энергии.

Одним из перспективных направлений повышения экологичности и энергоэкономичности тепломассообменных процессов предприятий текстильной промышленности является использование скрубберов с управляемым вращающимся барботажным слоем, позволяющих одновременно с улавливанием вредных примесей, содержащихся в парогазовых выбросах пыли, утилизировать и их теплоту.

Тепломассообменные и гидродинамические процессы, происходящие во вращающихся барботажных скрубберах, значительно сложнее, чем в обычных аппаратах (регенеративных, рекуперативных и барботажных колоннах).

Повышение эффективности тепло- и массопередачи в газовых пузырьках в поле

высоких центробежных ускорений происходит вследствие увеличения скорости вращающегося слоя жидкости, повышения объемного расхода вдуваемого газа, а также вследствие индуцирования интенсивных циркуляционных потоков жидкости вблизи поверхности пузырька при его поступательном движении.

Основными определяющими параметрами двухфазных потоков в скрубберах барботажного типа являются: диаметр питающего отверстия d_0 , скорость течения газа в питающих отверстиях u_0 , центробежное ускорение j , толщина теплообменного слоя $H_{ж}$, диаметр камеры теплообменника D , аксиальная скорость жидкости $W_{ж}$ и т.д. [1].

За характерный размер принимается диаметр газового пузырька $d_{п}$ в момент отрыва. При решении задачи определения $d_{п}$ использовались методы теории подобия. Рассматривался баланс сил, действующих на пузырек газа во вращающемся аксиально

текущем слое жидкости: $F_1 = \frac{\pi d_0}{4} \rho_r u_0^2$ – сила динамического напора газа (ρ_r – плотность газа); $F_2 = (\rho_{ж} - \rho_r) j V_0$ – подъемная сила ($\rho_{ж}$ – плотность жидкости, V_0 – объем пузырька); $F_3 = \xi_1 \frac{\pi d_n^2}{4} \rho_{ж} u_1^2$ – сила гидродинамического сопротивления (u_1 – скорость движения жидкости относительно пузырька, ξ_1 – коэффициент сопротивления); $F_4 = \xi_2 \pi d_n^2 \rho_{ж} w_{ж}$ – сила гидравлического сопротивления сносщего потока жидкости (ξ_1 – коэффициент сопротивления).

Силами поверхностного натяжения, тяжести и присоединенной массы можно пренебречь ввиду их малости.

В соответствии с теорией размерности и рядом допущений физического характера получим следующую зависимость:

$$\frac{d_n}{d_0} = f \left(\frac{u_0^2}{j d_0}, \frac{w_{ж} d_n \rho_{ж}}{\mu_{ж}}, \frac{\rho_{ж}}{\rho_r}, \frac{\mu_r}{\mu_{ж}} \right). \quad (1)$$

Экспериментальные исследования проводились на специально созданной модели

$$\frac{d_n}{d_0} = 0,68 \frac{(\rho_{ж} / \rho_r)^{0,14}}{1 - (\mu_r / \mu_{ж})^{0,32}} \left(\frac{u_0^2}{j d_0} \right)^{0,16} (1 - 0,000125 \text{Re}_{ж}). \quad (2)$$

В результате исследования показано, что потери полного давления газа при его барботировании через вращающийся теплообменный слой в широком диапазоне изменения параметров скруббера могут быть приняты равными перепаду давлений на жидком слое, обусловленному действием центробежных сил.

На основании имеющихся в литературе расчетных данных по тепло- и массообмену [2...5], которые свидетельствуют о его высокой интенсивности в барботажных слоях, допускается, что температура жидкости во вращающемся барботажном скруббере изменяется только в осевом направлении, а в радиальном происходит выравнивание температуры из-за интенсивного перемешивания, и что температура газа на выходе из барботируемого слоя

вращающегося барботажного скруббера со следующими параметрами:

$$\text{Re}_{ж} = f \frac{w_{ж} d_n \rho_{ж}}{\mu_{ж}} = 2 \cdot 10^3,$$

$$\text{Re}_r = \frac{u_0 d_0 \rho_r}{\mu_r} \leq 10^5,$$

$40 \leq j \leq 1000$ – отношение центростремительного ускорения к ускорению свободного падения; диаметр питающего отверстия $d_0 = 0,3 \dots 1,5$ мм; диаметр камеры $D = 120$ мм; количество отверстий $N = 3600$. В качестве рабочих тел использовались: жидкость – вода и глицерин, газовых – воздух, гелий, азот. Исследования проводились методом скоростной киносъемки со скоростью 3000...4000 кадров в секунду. Диаметр пузырька и частота его отрыва определялись на фотоувеличительном столе.

Полученные экспериментальные данные обобщены в виде критериальной зависимости:

равна температуре жидкости.

Записывая для схемы перекрестного тока баланс тепла с учетом фазовых превращений для элементарного объема, после соответствующих преобразований получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dT_{ж}}{dx} = \frac{G_r(x) C_{pr} T_{ж}}{LC_{ж} G_{ж}} = \frac{G_r(x) C_p T_{r_0}}{LC_{ж} G_{ж}} - \frac{r G_n(x)}{LC_{ж} G_{ж}}, \quad (3)$$

где C_{pr} и $C_{ж}$ – теплоемкость газа и жидкости; $G_r(x)$, $G_n(x)$ – расход массы газа и пара в скруббере; r – теплота парообразования; x – продольная координата; $T_{ж}$, T_r – температура жидкости и газа на входе в скруббер; L – длина скруббера.

Согласно решению дифференциального уравнения (3) при $G_{\pi}/L = \text{const}$ температу-

ры жидкости $T_{ж\ell}$ и газа $T_{г\ell}$ на выходе из скруббера соответственно равны:

$$T_{жL} = (T_{ж0} - T_{г0}) e^{\frac{C_{pr} G_r}{C_{ж} G_{ж}}} + T_{г0} - \frac{r G_{\pi}}{C_{pr} G_r} \left(1 - e^{\frac{C_{pr} G_r}{C_{ж} G_{ж}}} \right), \quad (4)$$

$$T_{гL} = \frac{C_{ж} G_{ж}}{C_{pr} G_r} (T_{ж0} - T_{г0}) \left(1 - e^{\frac{C_{pr} G_r}{C_{ж} G_{ж}}} \right) + T_{г0} - \frac{r G_{\pi}}{C_{pr} G_r} \left[1 - \frac{C_{ж} G_{ж}}{C_{pr} G_r} \left(1 - e^{\frac{C_{pr} G_r}{C_{ж} G_{ж}}} \right) \right]. \quad (5)$$

Результаты экспериментального исследования теплообмена (вода, силиконовое масло и воздух), полученные на модели вращающегося барботажного скруббера, удовлетворительно согласуются с расчетными данными по формулам [4], [5].

Показано также, что увеличение толщины слоя жидкого теплоносителя с 10 до 20 мм практически не влияет на температурный режим скруббера, что подтверждает теоретический вывод о прогреве газа до температуры жидкости при $N_{ж}/d_{\pi} \approx 1,5...2$.

Кроме того, в результате расчетно-экспериментальных исследований гидродинамического процесса движения капель жидкости в 3-мерном потоке газа вращающегося барботажного скруббера установлено, что двухфазный поток газа в центральном канале содержит капли размером 1...250 мкм, а на выходе из скруббера 1...30 мкм, причем определяющее влияние на процесс выноса капель оказывает кинетическая энергия всплывающих в жидком слое пузырьков газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горшенин П.А. Математическое моделирование тепломассообменных процессов во вращающихся барботажных аппаратах // Сб. докл. III Международ. научн.-практ. конф.: Современные энергосберегающие тепловые технологии. – Москва-Тамбов, 2008.
2. Горшенин П.А. Математическое моделирование тепломассообменных процессов во вращающихся барботажных аппаратах // Сб. докл. V Международ. научн.-практ. конф.: Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности. – Санкт-Петербург, 2008.
3. Barret W.L. AIAA Paper, № 64-51.
4. Hammerton D., Carner F.H. Frans. Institut Chem.Engng. – Lond, V. 32.
5. Johns L.E., Bechmann R.B. // Jornal. – Vol 12, № 1.

Рекомендована кафедрой процессов и аппаратов пищевых производств. Поступила 30.11.11.