

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ВИХРЕВОМ СМЕСИТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ

Б.С. САЖИН, М.П. ТЮРИН

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н.Косыгина)

В химической и текстильной промышленности широкое распространение получили смесительные теплообменники аппараты, в которых теплоносителями являются, с одной стороны, влажный воздух и с другой – нагреваемая или охлаждаемая вода.

В настоящее время разработано множество конструктивных решений смесительных аппаратов, однако анализ показывает, что имеются большие возможности для их усовершенствования. Многие из них чувствительны к загрязнениям, характерным для текстильных и химических предприятий, обладают значительными габаритными размерами, то есть недостаточно полно с энергетической точки зрения используется рабочее пространство аппаратов, отличаются значительным каплеуносом и требуют установки сепараторов влаги.

На основе изучения данных о теплообменных устройствах контактного типа в МГТУ разработано несколько конструкций вихревых контактных теплообменников для утилизации теплоты паровоздушной смеси (ПВС) от теплотехнологического оборудования предприятий текстильной и химической промышленности [1...8, 10, 11]. В основу аппарата положена конструкция высокоэффективного пылеуловителя типа ВЗП [9].

Такое решение объясняется многими причинами: во-первых, все контактные аппараты нуждаются в сепарационных устройствах для отделения капель влаги от удаляемого из них газа, в данном аппарате этот вопрос так остро не стоит [6...8]; во-вторых, в предложенном аппарате обеспе-

чиваются высокие скорости потока газа без снижения эффективности улавливания влаги (15...25 м/с); в-третьих, этот аппарат можно использовать и для мокрой высокоэффективной очистки воздуха от пыли [1, 9] и, наконец, в-четвертых, одна из конструкций предложенного аппарата позволяет использовать его для абсорбционной очистки воздуха [4, 5, 10].

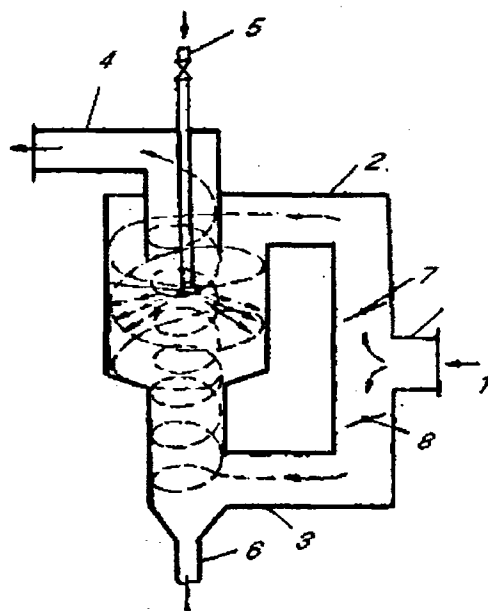


Рис. 1

Для утилизации теплоты ПВС от парных и выпарных установок, зрельников, сушильных барабанных и конвективных установок, а также для абсорбционной очистки газов предназначен вихревой аппарат модифицированной конструкции, представленной на рис.1, где 1 – подвод выбросного воздуха; 2 – рукав для нисходящего потока; 3 – рукав для восходящего потока; 4 – патрубок для отвода воздуха; 5

– устройство подвода жидкости с распылительной форсункой; 6 – отвод обработанной жидкости; 7, 8 – верхний и нижний регулирующие шиберы.

Конструкция предлагаемого аппарата отличается от конструкции описанной в [1, 10] тем, что обработанная жидкость направляется непосредственно в восходящий закрученный поток, а не стекает в поддон, минуя его. Практически в модифицированном аппарате в отдельных его зонах присутствуют все возможные поверхности раздела фаз (капельная, пленочная и пенная), что существенно увеличивает эффек-

тивность данной конструкции при решении возлагаемых на нее задач.

Следует отметить, что такие аппараты при их работе в качестве утилизаторов теплоты не чувствительны к загрязнениям влажного воздуха. Однако это является и их недостатком. Имеющиеся во влажном воздухе загрязнения могут абсорбироваться водой, что ограничивает область применения утилизаторов теплоты. Вместе с тем эта вода может использоваться без дополнительной очистки в тех процессах, где применяются данные вещества.

В табл.1 представлены технические характеристики аппарата.

Таблица 1

Наименование параметра	Количественная характеристика				
	800...2000	2000...5000	5000...8000	8000...16000	30000...80000
Количество ПВС, м ³ /ч					
Геометрические характеристики аппарата:					
диаметр, м	0,25	0,40	0,6	0,8	1,6
высота, м	1,5	2,6	4,2	6,0	14,0

С целью проведения опытно-промышленных испытаний были изготовлены опытные образцы вихревых аппаратов диаметром 0,25 м и высотой 1,5 м.

Испытания утилизаторов проводили на Московском шелковом комбинате, фабрике "Трехгорная мануфактура" и Камвольном комбинате (г. Киржач). Аппараты устанавливались на запарных установках, зрельниках и сушильных установках.

Паровоздушная смесь от теплотехнологического агрегата к опытно-промышленному образцу подавалась по воздуховоду, разделенному на два рукава: нижний и верхний. Соотношение расходов в нижнем и в верхнем рукавах регулировалось с помощью шиберов. Отвод охлажденной и очищенной ПВС осуществлялся к системе вентиляционных отсосов. Подвод воды к оросителям производился по трубопроводам с регулировочными вентилями, служащими для регулирования соотношения подачи воды к оросителям.

В процессе исследований измеряли температуру подводимой и отводимой ПВС по сухому и мокрому термометрам, а также давление с помощью трубок Пито-Прандтля и микроманометров ММН-240.

Температуру холодной воды, подаваемой на орошение, и нагретой воды измеряли ртутными термометрами. Измерения расхода орошающей воды осуществляли с помощью счетчиков ВТ-50, а количество нагретой воды вместе с конденсатом – путем измерения времени заполнения стандартной емкости.

В качестве оросителей использовали три типа форсунок: стандартную, серийно-выпускаемую широкофакельную форсунку типа ФШ с проходным диаметром от 2,5 до 10 мм, и шелевые форсунки с двумя различными проходными сечениями (28 и 56 мм²).

При проведении испытаний на запарной установке расход паровоздушной смеси изменялся в небольших пределах и в среднем составил $L_b = 1000 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,278 \text{ м}^3/\text{с}$. Это объясняется тем, что изменение расхода в широких пределах было недопустимо по технологическим условиям производства.

В среднем соотношение расходов нисходящего и восходящего потоков составило 2:1, поскольку именно это соотношение оказалось наиболее эффективным для данного типа аппаратов. При этом расход

орошающей воды менялся в широких пределах от $G_{\text{в}}=700$ кг/ч до $G_{\text{в}}=2600$ кг/ч. Температура ПВС на входе в аппарат колебалась от 96 до 98°C, а на выходе от 24 до 90°C. Такие высокие параметры нагретой воды при испытаниях на запорной установке объясняются очень высоким содержанием пара в ПВС, близким к состоянию насыщения воздуха при данных температурах.

Таким образом, при утилизации теплоты ПВС данных параметров возможно получение температур нагретой воды в широком диапазоне параметров, определяемых потребностью предприятия в ее количестве и температуре.

Определение вида критериальной зависимости проводили при следующих допущениях.

Известно, что в контактных аппаратах имеет место совокупность процессов: явного теплообмена, не осложненного массообменом; тепломассообмена и массообмена.

В качестве движущих сил процессов были приняты следующие величины: движущей силой процесса теплообмена, как обычно бывает, принята разность температур между газом и жидкостью, то есть температурный напор Δt ; движущей силой процесса тепломассообмена – разность

между температурой жидкости и температурой газа по мокрому термометру; движущей силой процесса массообмена – разность влагосодержаний насыщенного и ненасыщенного газа.

В результате получено критериальное уравнение для коэффициента интенсивности тепломассообмена:

$$Km = A Re^b Vm_1^d, \quad (1)$$

где A, b, d – постоянные коэффициенты критериального уравнения, определяемые

из эксперимента; $Km = \frac{t_2 - t_{\text{ж.н}}}{t_1 - t_{\text{ж.н}}}$ – отношение разностей температур;

Re – число Рейнольдса; Vm_1 – число подобия тепловых эквивалентов.

Число Re определялось по соотношению

$$Re = \frac{U_{\text{г}} R}{\nu_{\text{г1}}}, \quad (2)$$

где за $U_{\text{г}}$ принимали тангенциальную скорость газа на входе в аппарат.

Величину Vm_1 определяли из соотношения

$$Vm_1 = Vm + 1, \quad (3)$$

где Vm – тепловой эквивалент:

$$Vm = \frac{G_{\text{ж}} c_{\text{Рж}}}{G_{\text{г}} c_{\text{г}}} = \frac{G_{\text{ж}} c_{\text{Рж}}}{(G_{\text{г}} c_{\text{Рв}} + \frac{r_0 \Delta d_{\text{г.м}}}{\Delta t_{\text{г.м}}})} = \frac{Vw_{\text{н}}}{1 + Ke_{\text{г}}}, \quad (4)$$

где $Ke_{\text{г}} = \frac{r_0 \Delta d_{\text{г.м}}}{c_{\text{Рв}} \Delta t_{\text{г.м}}}$ – коэффициент испарения, равный отношению скрытой теплоты к явной при изменении энтальпии газа от начального значения до конечного;

$Vw_{\text{н}} = \frac{G_{\text{ж}} c_{\text{Рж}}}{G_{\text{г}} c_{\text{Рв}}}$.

В практических расчетах все значения, входящие в Vm_1 , вычисляются при начальных параметрах состояния. Соответственно теплоемкость вычисляется из выражения $c_{\text{Рв}} = c_{\text{Pr}} + c_{\text{n}} d_{\text{1м}}$, а отношение

$\Delta d_{\text{г.м}} / \Delta t_{\text{г.м}}$ как предел при $t_{2\text{м}} \rightarrow t_{1\text{м}}$ и $d_{2\text{м}} \rightarrow d_{1\text{м}}$, то есть как $d(d_{\text{м}}) / dt_{\text{м}}$. Другими словами, данная производная представляет собой тангенс угла наклона касательной к линии насыщения газа.

С достаточной для практики точностью производную можно вычислять приближенно [12]:

$$\frac{d(d_{\text{м}})}{dt_{\text{м}}} \approx \frac{\Delta d_{\text{R}}}{\Delta t_{\text{R}}}, \quad (5)$$

где $\Delta t_R = t_{iMR} - t_{iM} = 1^\circ\text{C}$ – расчетная разность температур; $\Delta d_R = d_{iMR} - d_{iM}$ – расчетная разность влагосодержаний, соответствующих температурам t_{iMR} и t_{iM} .

Обработку результатов эксперимента проводили по двум направлениям. Определялась зависимость, предложенная в [12] критериальная коэффициента эффективности теплообмена Ke от комбинированного числа Рейнольдса-Фруда Re_K , в котором за скорость w была принята скорость воды, выходящей из форсунок, и числа подобия тепловых эквивалентов Vm_1 , то есть зависимость $Ke = f(Re_K, Vm_1)$, и приведенная выше критериальная зависимость $Ke = f(Re, Vm_1)$, где вместо комбинированного числа Рейнольдса-Фруда использовалось число Рейнольдса.

Комбинированное число Рейнольдса-Фруда представляет собой произведение числа Рейнольдса на число Фруда:

$$Re_K = Re Fr = \frac{U_r l w^2}{\nu_r g_n l} = \frac{w^3}{\nu_r g_n}, \quad (6)$$

где g_n – напряженность поля тяготения (в поле центробежных сил $g_n = U_r^2 / R$); U_r , w – соответственно тангенциальная и радиальная составляющие скорости газа; l – характерный размер.

Постоянные коэффициенты критериальной зависимости находились при помощи метода наименьших квадратов для многофакторного эксперимента. В результате обработки данных при использовании в критериальной зависимости числа Рейнольдса-Фруда был получен большой разброс данных. В то же время при использовании в критериальной зависимости числа Рейнольдса получили вполне удовлетворительные результаты. При этом числа Re менялись в пределах 900...2000, а числа Vm_1 – в пределах 1,15...2. Средняя точность корреляции составила 9% при максимальной около 20%.

В верхнем и нижнем подводных каналах скорость поддерживалась одинаковой при соотношении соответствующих расхо-

дов 2:1, что обеспечивалось проходными сечениями верхнего и нижнего входов в аппарат. Именно это соотношение и служило гарантией максимальной эффективности аппарата.

В результате получено следующее критериальное уравнение для инженерных расчетов процесса теплообмена в указанном аппарате:

$$Km = 5,91 Re^{-0,325} Vm_1^{-0,35}. \quad (7)$$

Для определения гидродинамического сопротивления аппарата можно использовать ряд зависимостей [9]. Мы рекомендуем зависимости (8) и (9):

$$\Delta P = \xi_n \frac{\omega_n^2}{2} \rho_{в.в.}, \quad (8)$$

где ω_n – средняя скорость газа, отнесенная к поперечному сечению аппарата, м/с; $\rho_{в.в.}$ – плотность газа на входе в аппарат, кг/м³; ξ_n – коэффициент гидравлического сопротивления.

Величина ξ_n зависит от кратности расхода K^* , определяемого из соотношения

$$K^* = V_{n2} / V_n, \quad (9)$$

где V_{n2} , V_n – соответственно объемные расходы газа через верхний подводной канал и полный расход через аппарат.

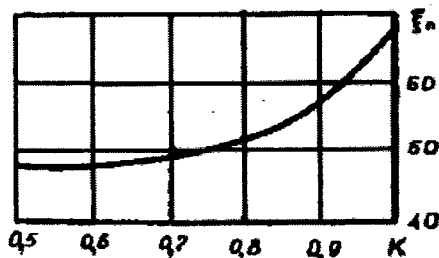


Рис. 2

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ_n от кратности расхода K^* представлена на рис.2.

ВЫВОДЫ

1. Разработана конструкция высокоэффективного утилизатора теплоты высоковлажных парогазовых смесей, отводимых от текстильного оборудования.
2. Получена критериальная зависимость для определения эффективности теплообмена в вихревом смесительном аппарате.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ 1638517. Контактный теплообменник / Б.С. Сажин, В.И. Щербаков, М.П. Тюрин и др. – Оpubл. 11.03.93.
2. Патент РФ 1702145. Контактный теплообменник / Б.С. Сажин, В.И. Щербаков, М.П. Тюрин, М.Ф. Малышева. – Оpubл. 01.12.90.
3. Патент РФ 1719862. Контактный теплообменник / В.И. Щербаков, М.П. Тюрин. – Оpubл. 14.04.93.
4. Патент РФ 2006775. Контактный теплообменник / В.И. Щербаков, М.П. Тюрин, В.И.Курин. – Оpubл. 30.01.94.
5. Патент РФ 2044246. Контактный теплообменник / В.И. Щербаков, М.П. Тюрин, В.И.Курин. – Оpubл. 20.09.95
6. *Тюрин М.П. и др.* Утилизация теплоты паровоздушной смеси от сушильных установок // Тез.

докл. 2-ой Всесоюз. конф.: "Проблемы энергетики". – М.: МЭИ, 1987.

7. *Тюрин М.П., Курин В.И., Харамы Е.В.* Аппарат для утилизации тепла выбросного воздуха промышленных предприятий // Тез. докл. научн. конф. – М.: РХТУ, 1999.

8. *Тюрин М.П., Цыганов К.И.* Аппарат для утилизации тепла и очистки выбросного воздуха промышленных предприятий // Мат. междунар. симпоз.: "Химия сегодня и завтра". – М.: Президиум АН РФ, 1996.

9. *Сажин Б.С., Гудим Л.И.* Вихревые пылеуловители. – М.: Химия, 1995.

10. *Щербаков В.И., Тюрин М.П., Курин В.И.* Многофункциональный аппарат для утилизации тепла и очистки выбросного воздуха от зрельников, выпарных и запарных установок // Тез. докл.: Экологически защищенные системы промышленной вентиляции. – М.: Об-во "Знание" РФ, 1992.

11. *Щербаков В.И., Тюрин М.П., Курин В.И.* Аппарат для утилизации тепла и очистки выбросного воздуха теплотехнологического оборудования текстильных предприятий // Тез. докл.: Способы и средства очистки воздуха от загрязнений. – М.: Об-во "Знание" РФ, 1993.

12. *Андреев Е.И.* Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.

Рекомендована кафедрой процессы и аппараты химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 03.10.01.