УДК 66.048.37

М. М. Башаров, А. Г. Лаптев

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗОВ В ПРОТИВОТОЧНЫХ НАСАДОЧНЫХ СКРУББЕРАХ

Ключевые слова: теплообмен, структура потоков, насадки, противоток, охлаждение пирогаза.

Рассмотрена математическая модель для расчета эффективности охлаждения газов в противоточном насадочном слое скруббера при пленочном режиме. Модель построена с использованием уравнений структуры потоков – диффузионной и ячеечной. Получена система уравнений для расчета профилей температур газа и жидкости по высоте колонны. Показан пример решения производственной задачи охлаждения пирогаза водой.

Keywords: heat exchange, flow pattern, nozzle, countercurrent, cooling pyrogas.

A mathematical model for calculating the efficiency of the cooling gas in a countercurrent packed bed scrubber in film mode is considered. The model is constructed using equations of flow structure - diffusion and cell models. A system of equations to calculate the temperature profiles of gas and liquid along the column height is considered. An example of solving production problems of pyrogas cooling water is shown.

Введение

В химической технологии очень широкое применение находят насадочные колонны для проведения тепломассообменных и сепарационных процессов [1,2]. Известны многие сотни конструкций насадок [3,4].

Для практических расчетов промышленных колонн с хаотичными и регулярными насадками наибольшее применение находят модели структуры потоков: диффузионная и ячеечная. Уравнения этих моделей записываются как для жидкой, так и для газовой фаз, а межфазный перенос учитывается в виде объемных источников [5,6]. Это вызвано тем, что при записи уравнений переноса для каждой фазы задать граничные условия четвертого рода (на межфазной поверхности) практически невозможно из хаотичного распределения элементов насадок. Использование же диффузионных или ячеечных моделей с коэффициентами обратного перемешивания или при известном числе ячеек, а также с объемными источниками массы и тепла, позволяет решать задачи модернизации или проектирования промышленных аппаратов.

Диффузионная модель

Рассмотрим процесс охлаждения газа жидкостью в противоточной насадочной колонне (скруббере).

Уравнения однопараметрических диффузионных моделей теплопереноса с источниками тепла имеют вид:

по жидкой фазе

$$\rho_{ж} c_{рж} W_{ж} \frac{dT_{ж}}{dz} = D_{пж} \frac{d^2 T_{ж}}{dz^2} - \alpha_{г} a_v \left(T_{г} - T_{ж}\right), \quad (1)$$

по газовой фазе

$$\rho_{г} c_{рг} W_{г} \frac{dT_{г}}{dz} = D_{пг} \frac{d^2 T_{г}}{dz^2} + \alpha_{г} a_v \left(T_{г} - T_{ж}\right), \quad (2)$$

где $T_{ж}$, $T_{г}$ – температуры жидкости и газа, ºС; $W_{ж}$, $W_{г}$ – средние скорости жидкости и газа, м/с; $D_{пж}$, $D_{пг}$ – коэффициенты обратного перемешивания жидкой и газовой фаз, м^2/с; $c_{рж}$, $c_{рг}$ – удельные теплоемкости жидкой и газовой фаз, Дж/(кг К); $\alpha_{г} a_v$ – объемный коэффициент теплоотдачи в газовой фазе, Вт/(м^{3}К).

Источник тепла записан исходя из того, что основное сопротивление теплопередачи сосредоточено в газовой фазе. Уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи в газовой фазе насадочных колонн даны в работах [1,4,7,8]. При записи потоков тепла предполагается, что испарение жидкости незначительно.

Средняя скорость жидкости в насадке связана с удельным расходом и задержкой жидкости

$$W_{ж} = \frac{U}{\varepsilon_{ж}}, \quad (3)$$

где U – плотность орошения, м^3/(м^{2}с); $\varepsilon_{ж}$ – задержка жидкости в слое, м^3/м^3.

Средняя скорость газа

$$W_{г} = \frac{V_{г}}{S\left(\varepsilon_{св} - \varepsilon_{ж}\right)}, \quad (4)$$

где $V_{г}$ – объемный расход, м^3/с; S – площадь поперечного сечения колонны, м^2; $\varepsilon_{св}$– удельный свободный объем насадки, м^3/м^3.

Граничные условия к уравнениям (1), (2) при z=H (вход жидкости и выход газа):

$$T_{ж} = T_{нж} + \frac{1}{Pe_{ж}} \frac{dT_{ж}}{dz}; \frac{dT_{г}}{dz} = 0;$$

(условие Данквертса)

При z=0 (вход газа и выход жидкости)

$$T_{г} = T_{нг} - \frac{1}{Pe_{г}} \frac{dT_{г}}{dz}; \frac{dT_{ж}}{dz} = 0;$$

где $Pe_{ж}$, $Pe_{г}$ – числа Пекле обратного перемешивания.

Ячеечная модель

При числах $Pe_{г}$>3 можно перейти к ячеечной модели (рис.1), где $Pe_{г} = W_{г} H / D_{п}$. Тогда уравнение (2) запишем для i-ой ячейки в форме

$$\rho_{г} c_{рг} W_{г} \frac{T_{г\,i-1} - T_{г\,i}}{\Delta z} = \alpha_{г} a_v \left(T_{г\,i} - T_{ж\,i}\right). \quad (5)$$

Из (5) найдем температуру газа

$$T_{г\,i} = \frac{T_{г\,i-1} + T_{ж\,i} \dfrac{\alpha_{г} a_v \Delta z}{\rho_{г} c_{рг} W_{г}}}{1 + \dfrac{\Delta z \alpha_{г} a_v}{\rho_{г} c_{рг} W_{г}}}. \quad (6)$$

Температуру жидкости в i-ой ячейке найдем из уравнения теплового баланса

$$Lc_{pж}(T_{жi-1} - T_{жi}) = Gc_{pг}(T_{гi-1} - T_{гi}); \quad (7)$$

Отсюда получим

$$T_{жi} = \left[Lc_{pж}T_{жi-1} - Gc_{pг}(T_{гi-1} - T_{гi})\right](Lc_{pж})^{-1} \quad (8)$$

где L, G – массовые расходы жидкости и газа (кг/с) принимаются постоянными по высоте насадочного слоя.

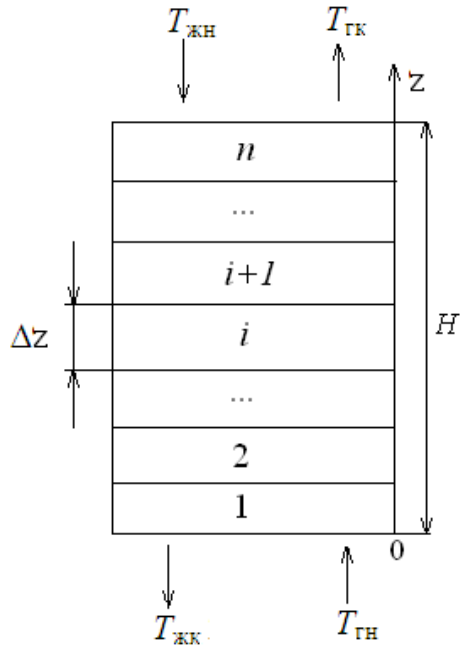


Рис. 1 - Условие деления насадочного слоя на ячейки

Уравнение (6) решается при i=0; $T_г = T_{гн}$; совместно с уравнением (8) при i=n+1, $T_ж$=$T_{жн}$.

Шаг решения $\Delta z = H/n$, где n – число ячеек, H – высота слоя, м. Число ячеек связано числом Пекле ($Pe_г \geq 3$)

$$Pe_г = 2(n-1). \quad (9)$$

Число Пекле находится, как правило, экспериментально или с использованием полуэмпирических зависимостей [9].

Решение уравнений (6) и (8) выполняется в итерационном цикле методом последовательных приближений.

Полученное решение должно удовлетворять уравнению теплового баланса

$$Lcp_ж(T_{жк} - T_{жн}) = Gcp_г(T_{гн} - T_{гк}) \quad (10)$$

Тепловая эффективность охлаждения газа запишется в виде

$$\eta_т = \frac{T_{нг} - T_{кг}}{T_{нг} - T_{ж.ср}} \quad (11)$$

где средняя температура жидкости в слое насадки $T_{ж.ср.}$=0,5($T_{жн}$+$T_{жк}$).

В качестве примера выполнен расчет охлаждения воздуха водой при атмосферном давлении в колонне с керамическими кольцами Рашига диаметром 25 мм. Скорость воздуха $W_г$=1,0 м/с; плотность орошения 10 м^3/(м^2 час).

Начальная температура воды $T_{жн}$=20ºС, воздуха $T_{гн}$=40ºС. В результате расчетов получена температура воздуха на выходе из слоя высотой 1 м $T_{гк}$= 22,0 ºС, а воды 22,5 ºС.

Тепловой баланс (10) соблюдается с погрешностью около 4%. Тепловая эффективность (11) составляет $\eta_т$=0,95. Предложенная система уравнений (6), (8) может использоваться для вычислений температурных профилей жидкости и газа по высоте колонны и теплового КПД при условии равномерного распределения подачи фаз в насадочный слой.

Охлаждение пирогаза водой

Рассмотрена задача охлаждения пирогаза водой в закалочных колоннах производства этилена.

Узел водной промывки пирогаза предназначен для охлаждения и отмывки пирогаза от кокса и смолы, а также для отстоя и отделения химически загрязненной воды от пиролизных смол с последующим ее охлаждением перед подачей вновь в колонну на промывку пирогаза.

Пирогаз от печей пиролиза и испарительно-закалочных аппаратов с температурой 380–400°С и давлением 0,6–0,8 кгс/см^2 поступает в колонну водной промывки и движется противотоком.

На входе в колонну пирогаз охлаждается циркуляционной водой (ЦВ), подаваемой насосом на впрыск, до температуры 100–105 °С.

Колонна водной промывки пирогаза имеет 7 уголковых и 7 клапанных тарелок. Уголковые тарелки расположены в нижней части колонны. Пирогаз, проходя через эти тарелки, отмывается от кокса и смол циркуляционной водой, поступающей в среднюю часть колонны.

Клапанные тарелки расположены в верхней части колонны. На этих тарелках происходит дополнительная отмывка пирогаза от смол и кокса и охлаждение до 45°С циркуляционной водой, поступающей в верхнюю часть колонны.

Охлажденный и очищенный пирогаз с температурой 40–45°С (по регламенту) и давлением 0,5–0,6 кгс/см^2 направляется на всас пирогазовых компрессоров цеха газоразделения.

В колонне пар, легкие и тяжелые смолы, кокс, поступающие с пирогазом, конденсируются и стекают в куб колонны. Далее из кубовой части закалочной колонны направляются в отделитель закалочной воды – отстойник. В отстойнике имеется три отделения, где вода отделяется от углеводородов.

Эффективность охлаждения пирогаза водой в колонне с тарелками низкая и температура выше требуемой, что дает дополнительную нагрузку на последующий узел компримирования. В связи с этим выполнены расчеты и разработаны технические решения по модернизации закалочных колонн.

Модернизация заключается в замене в верхней части клапанных тарелок на нерегулярную насадку «Инжехим», а в средней части – на регулярную с гофрированной поверхностью. Также был модернизирован отстойник очистки охлаждаемой воды [10]. После модернизации колонны и отстойника специалистами ИВЦ «Инжехим», совместно с работниками ОАО «Казаньоргсинтез», значительно повысилась эффективность работы узла охлаждения пирогаза, и его температура стала регламентной.

Разработанная математическая модель используется для расчета насадочных колонн на различных предприятиях нефте- и газопереработки [11,12] и дает удовлетворительные результаты.

Литература

1. Ю.А.Комиссаров, Л.С.Гордеев, Д.П. Вент. Процессы и аппарата химической технологии. Учебное пособие для вузов; под редакцией Ю.А. Комиссарова – М.: Химия, 2011.
2. А.Г. Лаптев, Н.Г. Минеев, П.А. Мальковский. Проектирование и модернизация аппаратов разделения в нефте- и газопереработке – Казань: Печатный двор, 2002.
3. Б.А. Сокол, А.К. Чернышев, Д.А. Баранов. Насадки массообменных колонн – М.: «Галилея-принт», 2009.
4. А.М. Каган, А.Г. Лаптев, А.С. Пушнов, М.И. Фарахов. Контактные насадки промышленных тепломассобменных аппаратов; под ред. А.Г. Лаптева– Казань: Отечество, 2013.
5. Коган В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии – Л.: Химия, 1977.
6. С.Г. Дьяконов, В.И. Елизаров, А.Г. Лаптев. Теоретические основы химической технологии, 1991. Т. 25. № 6. С. 783–795.
7. А.Г. Лаптев, Т.М. Фарахов, Е.А. Лаптева. Теоретические основы химической технологии. 2015. №4. С.407-414.
8. А.Г. Лаптев, Е.А. Лаптева. Вестник Казан-го технол. ун-та. 2013. Т.16. №23. С. 64-69.
9. А.Г. Лаптев, Е.А.Лаптева. Фундаментальные исследования. 2015. №2. С. 2810- 2814.
10. М.И. Фарахов, А.Г. Лаптев. Вестник Казан-го технол. ун-та. 2011. №9. С. 152-158.
11. Башаров М.М., Лаптева Е.А. Модернизация промышленных установок разделения смесей в нефтегазохимическом комплексе – Казань: Отечество. 2013. 297 с.
12. Башаров М.М., Лаптев А Г. Энергетика Татарстана. 2014. № 1. С.21-24.

© **М. М. Башаров**, к-т техн. наук, заместитель генерального директора по техническому обслуживанию и инжинирингу ОАО «ТАНЕКО», _kgeu@mail.ru; **А. Г. Лаптев**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технология воды и топлива КГЭУ, tvt_kgeu@mail.ru.

© **M. M. Basharov**, PhD, deputy General Director of Maintenance and Engineering of "TANECO", tvt_kgeu@mail.ru; **A. G. Laptev**, PhD, professor, head of the department "Technology of water and fuel," KSPEU, tvt_kgeu@mail.ru.