ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЗАКОНЫ ТЕОРИИ МАССОПЕРЕНОСА

1. Общие сведения

В природе и технике наряду с теплообменными широко распространены и массообменные процессы. Очень часто они идут совместно, и от интенсивности одних зависит скорость других. В природе это, например, - процессы переноса теплоты и массы воздушными и водяными течениями и процессы окисления веществ в живых организмах. В технике — процессы восстановления металлов из руд и окисления (горения) топлив, примесей и железа при плавке и нагреве стали.

В теории массообмена различают массоотдачу и массопередачу. Массоотдача — пе­ренос массы в пределах одной фазы (гомогенный массоперенос), а массопередача — пе­ренос одного или нескольких веществ из одной фазы в другую через поверхность раздела фаз (гетерогенный массоперенос).

Состав фаз выражают: в объемных концентрациях, кг/мэ или кмоль/м3; в массовых или мольных долях, кг/100 кг или кмоль/ЮО кмоль. Состав газовых смесей выражают парциальными давлениями.

Основную часть жидкой или газообразной фазы, в которой поле концентраций компонентов постоянно, называют ядром. Дело в том, что на поверхности раздела

фаз концентрации компонентов отличаются от концентраций этих же веществ в ядрах. Изменение концентраций от значений на границе до их величины в ядре происходит в пределах тонкого пограничного слоя между поверхностью раздела фаз и ядром. Несмотря на относительное перемещение фаз, режим движения в концентрационном пограничном слое очень часто сохраняется ламинарным.

Перенос массы между фазами происходит до наступления подвижного равновесия, при котором из одной фазы во вторую переносится столько же вещества, сколько его пере­ходит на второй фазы в первую. Массообмен в пределах одной фазы заканчивается после выравнивания концентраций по всему объему.

Массообмен — самопроизвольный процесс переноса какого-либо вещества в форме молекул, атомов, ионов в пространстве с неоднородной концентрацией этого вещества. Массообмен имеет место и при неоднородных полях температур и давлений в рассматри­ваемом объеме.

Молекулярную диффузию под действием неоднородного распределения концентра­ций в объеме называют концентрационной диффузией. Если причиной диффузии явля­ются разности'(градиенты) температур или давлений, то эти виды диффузионного переноса вещества называют термо- или бародиффузией. Вещество может переноситься под одновременным воздействием нескольких градиентов: концентраций, температур и давлений.

Перенос массы помимо молекулярной диффузии может также осуществляться движущимися массами (конвекцией). Совместный перенос массы молекулярной диффузией и конвективным переносом называют конвективным массообменом.

Молекулярная диффузия имеет место в неподвижных потоках или в пограничных слоях, находящихся вблизи границы раздела фаз. Она обусловливается беспорядочным движением частичек переносимого вещества. Перенос вещества под действием турбу­лентных пульсаций называют турбулентной диффузией.

Направление переноса вещества внутри фазы или между фазами определяется градиентом его концентраций в отдельных точках системы. Вещество всегда переходит из фазы, где его содержание выше равновесного, в фазу или область, в которых его концентрация ниже равновесного значения (или от большего градиента к меньшему).

Скорость массопередачи связана с механизмом переноса распределяемого вещества между фазами, между которыми происходит массообмен.

Наиболее распространенные процессы массопередачи в металлургии: абсорбция — поглощение газа жидкостью; адсорбция — поглощение газов, паров или жидкостей твердыми поглотителями; восстановление — удаление кислорода из оксидов металлов (руд); десорбция — процесс обратной абсорбции и адсорбции; насыщение — обогащение поверхностных слоев стали одним или несколькими химическими элементами; окис­ление — соединение горючего вещества с окислителем, например, при горении топлива в рабочем пространстве печей или горение некоторых химических элементов в распла­вах (стали, штейне и т.д.); растворение твердых веществ в жидкостях; сушка - удале­ние влаги из твердых материалов путем ее испарения.

Многие технологические процессы в металлургии реализуются несколькими одно­временно протекающими гетерогенными процессами массопереноса. Причем направ­ление переноса веществ из фазы в фазу определяется его концентрациями в фазах и условиями равновесия. Перенос массы в процессах сопровождается переносом энергии.

Плотность потока массы, кг/(м2 • К), вещества т, переносимого молекулярной диффузией в бинарных (двухкомпонентных) смесях, можно определить по первому закону Фика:

m^-D^dc/dri), (5.1)

где Dj — коэффициент диффузии i-того компонента, м2/с; dc/dn — градиент концентра­ций, кг/м4.

Смысл коэффициента диффузии, кг • м/[(кг/мэ) • с], можно понять из формулы D = mdn/dc.

Следовательно, он определяет количество вещества, диффундирующего в единицу времени через единицу поверхности при градиенте концентраций, равном 1. Это физи­ческая константа, не зависящая от гидродинамических условий массопереноса. Бе значение зависит от вида переносимого вещества, свойств среды, через которую оно диффундирует, температуры и давления. Коэффициенты диффузии газа в среду другого газа составляют 0,1 — 1 см2/с, а диффузии газа в жидкости ~ 1 см2/(сут), т.е. в 1 - 105 меньше. Следовательно молекулярная диффузия — весьма медленный процесс.

Обычно величина коэффициента диффузии в газах в литературе приводится для Г0 = 273 К и р0 = 1 • 105 Па. Поэтому ее обозначают DQ. Значения D при иных давлениях можно вычислить по формуле

D = D0(p/P0)3'2.

В справочниках коэффициенты диффузии в жидкостях даны для температуры 20 °С (р20). Пересчитать эту величину для другой температуры можно по формуле

D = D3O[l + d(r-20)],

где d = 6,33 |i0'5/p°>33.

В последнем выражении ц — динамический коэффициент вязкости растворите­ля, Па • с; р — плотность растворителя, кг/м3.

Для газовых фаз закон Фика можно выразить с помощью уравнения состояния идеальных газов.

Концентрация какого-либо компонента фазы, кг/м3,

с = 1/у = р/(ЯГ).

Здесь v — удельный объем компонента при его локальном парциальном давлении р, м3/кг; R — газовая постоянная, Дж/(кг ■ К); Т — температура компонента, К; р — местное парциальное давление диффундирующего компонента, Па. При Г- const

— = (RT)-4p/un и m—[D/(«T)]dp/dn = -D dp/dn. dn

Здесь Dp — коэффициент молекулярной диффузии газа в газе, отнесенный к градиенту парциального давления, с.

Для бинарной смеси (состоящей из двух компонентов) коэффициенты диффузии
компонентов и Dp неодинаковы вследствие различия газовых постоянных.

Поэтому их отношение, при D г = D2

где Ц1 и Ц2 — молекулярные массы компонентов бинарной смеси, кг/моль.

Знак минус с правой части закона Фика указывает на то, что поток массы и градиент концентрации направлены в противоположные стороны.

Для бинарной смеси справедливо соотношение D1 = D2, т.е. коэффициенты диффузии взаимно диффундирующих веществ равны. Для многокомпонентной смеси это соотно­шение не выполняется.

Плотность потока массы, переносимой в пределах фазы турбулентной диффузией,

m = -DT(dc/dn), (5.2)

где Dx — коэффициент турбулентной диффузии, зависящий только от гидродинами­ческих условий процесса (с\* орости потока, масштаба турбулентности), м2/с. Известно, 4ToDI>D.

В жидкостях и газах суммарный перенос массы молекулярной и конвективной диффузией определяется выражением

m ■ mM + mK = — Ddc/dn + cw, (5.3)

где mR — плотность потока массы, переносимой конвективной диффузией, С — кон­центрация диффундирующего вещества внутри фазы, кг/м3; w — скорость потока вещества внутри фазы, м/с.

В (5.3) градиент концентрации и скорость потока противоположны по направлению.

Движение потока значительно увеличивает перенос массы, поэтому тк ~> тм.

Плотность потока массы, кг/(м2 • с), внутри фазы, например, от поверхности раздела в ядро, можно вычислить по уравнению

т = В(сп-с0). (5.4)

Здесь (сп — cQ) — разность концентраций, являющаяся движущей силой процесса; с. — средняя концентрация в ядре потока; сп — средняя концентрация на поверхности раздела фаз; В — коэффициент массоотдачи. Он определяет количество массы, перено­симой от поверхности раздела фаз в ядро фазы (или в обратном направлении) через единицу поверхности в единицу времени при движущей силе (сп — cQ) равной единице. Он не является физическим свойством вещества; это — кинетическая характеристика, зависящая не только от свойств фазы, но и от гидродинамических условий течения потока. Этот коэффициент учитывает как молекулярный, так и турбулентный перенос вещества. Коэффициент массоотдачи может быть выражен в разных единицах в зависимости от выбранной системы выражения движущей силы процесса переноса вещества. В общей форме

В = m/Дс = кг [м2 • с (е.д.с.)], где е.д.с. — единицы движущей силы.

Если движущей силой процесса переноса является разность объемных концентраций, кг/м3, то коэффициент массоотдачи, м/с, обозначают р0. Если же разность концентраций выражена в относительных единицах (кг/кг или кмоль/кмоль), то коэффициент массо­отдачи, кгДм2 • с), обозначают Рс или рт соответственно. Если же движущей силой переноса является разность парциальных давлений, Па, то коэффициент массоотдачи, с/м, обозначают Рр.

Уравнение (5.4) — аналог уравнения Ньютона - Рихмана.

Интенсифицировать массообменные процессы можно за счет повышения коэффи­циента массоотдачи или увеличения площади поверхности, воспринимающей или отдающей массу, так как разность концентраций устанавливается условиями техноло­гического процесса. Чаще всего прибегают к увеличению поверхности массообмена /, осуществляя, например, обработку материала в слое.

Если температура диффундирующего газа не изменяется по объему фазы, то и| уравнения состояния газа можно записать, что концентрации

сп-1/тп-Рп/(ЙТ) и с0 = 1/у0 = р0/(ЙГ).

Поэтому разность концентраций сп - cQ = (рп - р0)/(КГ). Здесь vn и v0 - удельны! объемы диффундирующего газа при их парциальных давлениях рп и р0, м3/кг; рп и Р0 - парциальные давления газа у поверхности фаз и в ядре, Па.

При подстановке последнего соотношения в (5.4) получим формулу Дальтона для т, кг/(м2 • с):

т-[р/(йГ)](рп-р0) = рр(рп-р0), (5.3)

где рр — коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности парциальных давлений.

Коэффициенты массоотдачи можно определить следующим образом. Примем, что у поверхности раздела фаз существует ламинарный концентрационный пограничный слой, перенос массы в котором происходит молекулярной диффузией в соответствии с первым законом Фика:

m - -Ddc/dn = р(с„ - с0) = р Ас. Поэтому

P = -(D/Ac)dc/dn.

Если вместо разности концентраций воспользоваться разностью парциальных давл то

рр = -(£>р/Др) dp/dn = -[Dp/(pn - p0)]dp/dn,

где Dp = D/(RT) — коэффициент молекулярной диффузии какого-либо компон фазы, отнесенный к градиенту парциального давления, с.

Из вышеизложенного хорошо просматривается аналогия между Р и коэффици конвективной теплоотдачи, поэтому для отыскания величины коэффициентов ма отдачи применимы все те методы конвективного теплопереноса, которые были расе рены ранее.