

УДК 621.4

МЕЖКОМПОНЕНТНЫЙ МАССОПЕРЕНОС В ЗАКРУЧЕННОМ ГАЗОДИСПЕРСНОМ ПОТОКЕ С ПРОТИВОТОЧНЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ

Цыбульская О.Н.^{1,2}, Юдаков А.А.^{1,2}, Ксеник Т.В.¹

¹*Институт химии Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия*

²*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

Работа выполнена при финансовой поддержке
гранта Президиума ДВО РАН (проект №15-И-3-11) и
Министерства образования и науки РФ (договор №02.G25.31.0166)

АННОТАЦИЯ

Изложены результаты исследований межкомпонентного массопереноса в закрученном газодисперсном потоке, на основе эксперимента определены межкомпонентные коэффициенты массоотдачи. Получены критериальные зависимости и обобщенные уравнения для расчета эффективного массопереноса пригодные для инженерной практики. Экспериментальные данные свидетельствуют о высокой интенсивности массопереноса в

газодисперсном потоке с противоточным движением фаз. На примере процесса гидрофобизации минеральных дисперсных материалов органическими веществами показана возможность эффективного использования закрученных потоков в технологиях обработки дисперсных материалов. Приведена схема разработанной вихревой установки для гидрофобизации мелкодисперсных материалов.

ВВЕДЕНИЕ

Большая вариативность конструкций теплообменных устройств с активными гидродинамическими режимами вызывает затруднения при расчете теплообмена дисперсных частиц с газовым потоком без значительных упрощений, которые приводят к результатам, плохо согласующимся с опытными данными.

Известно, что основными характеристиками аппаратов, реализующих закрученные газовые потоки, являются коэффициенты тепло- и массоотдачи. Анализ научных публикаций свидетельствует, что имеющиеся сведения и надежные данные по определению коэффициентов переноса в вихревых устройствах немногочисленны. Это вызывает необходимость проведения экспериментальных исследований процессов переноса тепла и массы в условиях максимально соответствующих конкретному технологическому процессу и аппарату.

В Институте химии Дальневосточного отделения РАН был выполнен цикл экспериментальных исследований процессов теплообмена в вихревой установке, где обеспечивается противоточное движение газового потока и обрабатываемого дисперсного материала. Установлены экспериментальные коэффициенты теплоотдачи, опытные данные представлены в виде связи между критериями подобия [1].

Сложности в изучении теплообмена вызывает то, что в абсолютном большинстве реальных технологических процессов теплообмен осложнен массообменом, которые протекают совместно и определяются преимущественно поверхностью контакта фаз и интенсивностью их перемешивания. В этой связи было продолжено изучение массообмена в закрученном газовом потоке с противоточным движением компонентов на экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена ранее в статье [1].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Последовательность проведения экспериментов, оценка погрешности, выбор модельного материала, характерной температуры обработки, определение массовой концентрации материала в аппарате и скорости газового потока осуществлялись аналогично опытам при изучении теплообмена. Принципиальной особенностью массообменных исследований являлась специально разработанная весовая методика, основанная на измерении потери массы частиц по мере их перемещения в реакционном объеме вихревой камеры от одной точки замера (отбора пробы) до другой.

В качестве основного модельного процесса для изучения особенностей массопереноса принимался процесс сушки порошков железа и кварцевого песка в высокотемпературном газовом потоке. Движущей силой этого процесса по газовой фазе является разность концентраций водяных паров в пограничном слое у поверхности частиц (c_{nc}) и вдали от этой поверхности в объеме газа (c_r). Термическая диффузия, по нашим расчетным оценкам, ничтожно мала. При этом интенсивность сушки определяется как переносом пара от материала в поток сушильного агента (массоотдача), так и перемещением влаги в толщине материала (массопроводность). Массопроводность может быть учтена коэффициентом массопроводности D и зависит только от свойств материала и термодинамических параметров процесса сушки. Массоотдача зависит от свойств материала и газового потока, условий их взаимодействия, т. е. от режимных параметров технологического процесса и конструктивных особенностей аппарата, в котором он реализуется. Интенсивность массопередачи тесно связана с межкомпонентным теплообменом.

Выбор процесса сушки в качестве модельного объясняется достаточной изученностью его кинетики и динамики. В работе А.Н. Плановского [2] показано, что даже при расчетах массопроводности сушку можно рассматривать как чисто массообменный процесс, считая температурное поле высушиваемого материала специально вызванным наложением, влияние которого можно учесть, используя экспериментально полученные взаимосвязи между среднеобъемными температурой и влажностью материала в условиях работы рассматриваемого аппарата. Тем более, это обосновано при

рассмотрении конвективного теплопереноса, как в нашем случае. Кроме того, выбранные процесс сушки и материалы подобные модельным широко используются в промышленной практике и дают возможность не только применить, но и проверить полученные опытные результаты на реальных технологических аппаратах и процессах.

Некоторые сложности возникают при определении поверхности межкомпонентного взаимодействия F для капиллярно-пористых тел, так как испарение происходит через поверхность мениска воды, находящейся непосредственно на твердой поверхности и, в большей степени, в порах, трещинах, капиллярах. При этом по мере сушки поверхность и конфигурация менисков изменяется за счет их отступления вглубь материала. В связи с этим при расчете поверхность испарения принималась равной поверхности шара с диаметром, эквивалентным диаметру используемых при экспериментах частиц.

С учетом результатов предварительных экспериментов, стремления к получению наиболее точных замеров, режимных возможностей установки в опытах изменялись следующие факторы в указанных диапазонах: скорость газа-теплоносителя (продукты сгорания пропан-бутана в воздухе) на входе в камеру ($V_{вх} = 7,42...15,81$ м/с), температура газового потока ($t_r = 260...540^\circ\text{C}$), исходная влажность материала ($W_n = 0,515...1,91\%$), расход порошка ($G_n = 15...40$ кг/ч); массовая относительная концентрация частиц в потоке ($\mu = 1,8...4,8$ кг/кг для железного порошка и $\mu = 0,46...1,2$ кг/кг для кварцевого песка); крупность частиц ($d = 0,16...0,2$ мм для железного порошка, $d = 0,2...0,315$ мм для кварцевого песка); тип дисперсного материала (кварцевый песок, железный порошок ПЖ-2М). Все исследованные дисперсные материалы относятся к капиллярно-пористым с фиксированной структурой, причем объем пор (трещин) весьма мал, связь влаги с материалом адсорбционная и физико-механическая.

В базовых режимах (баз.) исследовались: железный порошок при $V_{вх} = 15,81$ м/с, $t_r = 260^\circ\text{C}$, $W_n = 0,515\%$, $\mu = 1,8$ кг/кг, $d = 0,18$ мм и кварцевый песок при $V_{вх} = 15,81$ м/с, $t_r = 410^\circ\text{C}$, $W_n = 1,25\%$, $\mu = 0,46$ кг/кг, $d = 0,315$ мм.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТА

Первично проводились измерения массы частиц влажных порошков при изменении указанных выше факторов, кривые нагрева и сушки материала изображены на рис. 1 и 2. В полях множества экспериментальных точек выделены данные, полученные при некоторых характерных режимах.

Основной экспериментальной величиной, определяемой с погрешностью 16% является коэффициент массоотдачи β (м/с). Расчетная формула для определения β исходя из традиционного

уравнения массоотдачи выглядит следующим образом:

$$\beta = \Delta m_T / [F \Delta t (c_{\text{пс}} - c_T)] = \Delta m_T R_n T / [F \Delta t (P_{\text{пс}} - P_T)].$$

При этом парциальное давление водяных паров у поверхности испарения ($P_{\text{пс}}$) определяется в соответствии с реальными температурными измерениями по таблице водяного пара как давление насыщения при $t_{\text{п}} = t_T$. Парциальное давление водяных паров вдали от поверхности испарения определяется по замерам влагосодержания или по расчету продуктов сгорания, являющихся в данном случае и сушильным агентом.

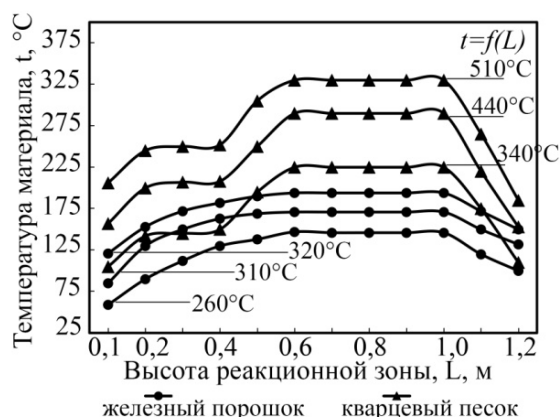


Рис. 1 Кривые нагрева обрабатываемого материала при характерной температуре рабочего газа.

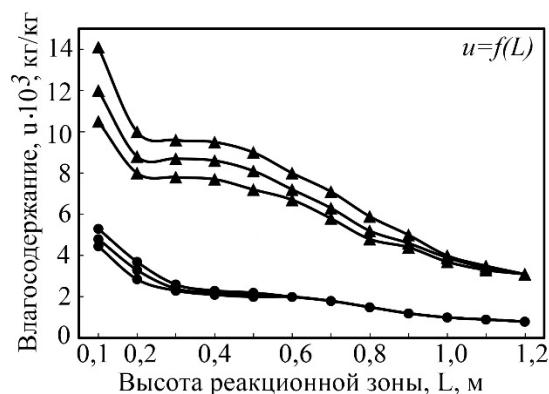


Рис. 2 Кривые сушки обрабатываемого материала при характерной температуре рабочего газа: 310°C для железного порошка, 440°C для кварцевого песка

Для обработки и анализа экспериментальных данных аналогично исследованию теплообмена [1] вводились два понятия:

- локального коэффициента массоотдачи β_i , характеризующего интенсивность массообмена на определенном участке траектории движения частиц между точками замеров (n-1) и (n), рассчитываемого по формуле:

$$\beta_i = [(m_{T(n-1)} - m_{Tn}) \cdot R_n T] / [\tau_{n-1 \dots n} \cdot F_T \cdot (P_{\text{пс}} - P_T)],$$

- интегрального коэффициента массоотдачи β_{Σ} , характеризующего интенсивность массообмена на участке от места ввода частиц в поток до рассматриваемой точки n, рассчитываемого по формуле:

$$\beta_{\Sigma} = [(m_{T0} - m_{Tn}) \cdot R_n T] / [\tau_{0 \dots n} \cdot F_T \cdot (P_{\text{пс}} - P_T)].$$

При этом температура T, при которой определялось $P_{\text{нас}}$, и t_T , при которой находилось парциальное давление в объеме газа P_T , принимались как среднеарифметические между двумя рассматриваемыми точками замеров.

Очевидно, что для участка от места ввода частиц до 1-й точки замера β_i и β_{Σ} совпадают, а также то, что β_{Σ} для последней точки замера (в бункере сбора обработанного материала) характеризует интенсивность массообмена в установке в целом.

На рис. 3 представлены изменения локальных коэффициентов массоотдачи при выделенных характерных режимах.

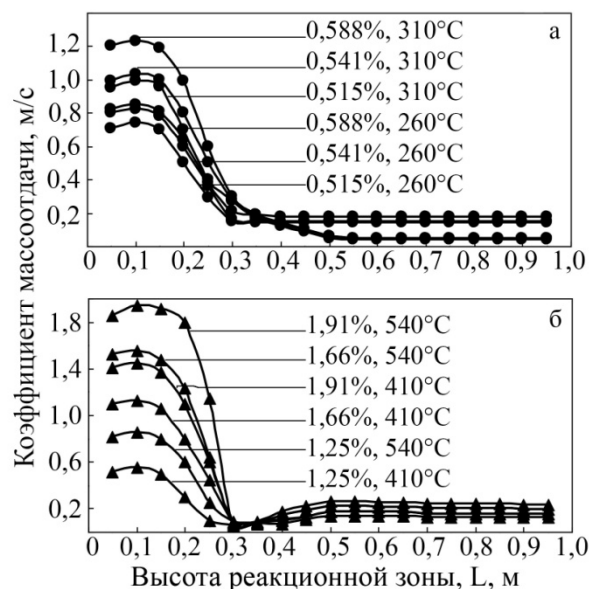


Рис. 3 Локальные коэффициенты массоотдачи в объеме камеры при изменении исходной влажности (%) материала и температуры (°C) рабочего газа: а) для железного порошка; б) для кварцевого песка

Из приведенных графиков видно, что интенсивность массообмена имеет выраженный максимум на начальном участке траектории частиц в верхней части камеры, несмотря на то что газ имеет максимальную температуру и скорость в сечении 0,6 м. При этом местоположение и величина β_{\max} зависят от начальной температуры газа: чем она выше, тем больше максимум коэффициента массоотдачи и тем быстрее по ходу движения частиц он достигается. Видимо, это объясняется тем, что на входном участке относительная скорость между газом и частицами (скорость скольжения U) достигает наибольших значений, т.к. частицы еще не вовлечены во вращательное движение.

Обращая внимание на абсолютные значения коэффициента массоотдачи ($\beta_{\Sigma\max} = 1,225\text{ м/с}$ для железного порошка и $\beta_{\Sigma\max} = 1,95\text{ м/с}$ для кварцевого песка), следует отметить, что это эффективные значения, соответствующие реальным условиям конвективной сушки. В этом случае тепло-массообмен принципиально неэквивалентен, теплота, переданная газом частицам, возвращается с испарившейся влагой в газовый поток лишь частично, т.к. значительная ее часть расходуется на нагрев материала, фазовый переход влага-пар, преодоление энергии связи влаги с материалом. Кроме того, сказывается неоднородность структуры двухкомпонентного потока, смещение частиц в пристенную зону.

В связи с этим действительные (эффективные) коэффициенты меньше эквивалентных, которые получают расчетными или экспериментальными путями при условиях, когда все тепло, подводимое от газа к частице, затрачивается на испарение влаги и с ее парами возвращается в газовый поток. Соотношение между эффективным и эквивалентным коэффициентами массообмена может быть определено из анализа теплового баланса между газом и твердым материалом за бесконечно малый промежуток времени [3].

Из полученных кривых кинетики сушки и анализа результатов экспериментальной обработки следует, что вполне корректно рассматривать внешний конвективный массообмен можно лишь на начальном участке траектории движения частиц, т.к. в дальнейшем все большее влияние оказывает массопроводность, зависящая от структуры и влажности материала. Кроме того, по мере движения частиц изменяется, как указывалось нами ранее, поверхность массообмена и другие характеристики процесса, плохо поддающиеся учету при обработке и анализе экспериментальных данных.

В дальнейшем при обобщении и анализе опытных данных использовалось диффузионное число Нуссельта $Nu_D = \beta d_T/D$, характеризующее интенсивность массообмена.

Эксперименты при изменении входной скорости показали, что с ростом $V_{\text{вх}}$ и соответственно Re_T и $Re_{\text{вх}}$ интенсивность массообмена во всем объеме камеры возрастает (рис. 4)

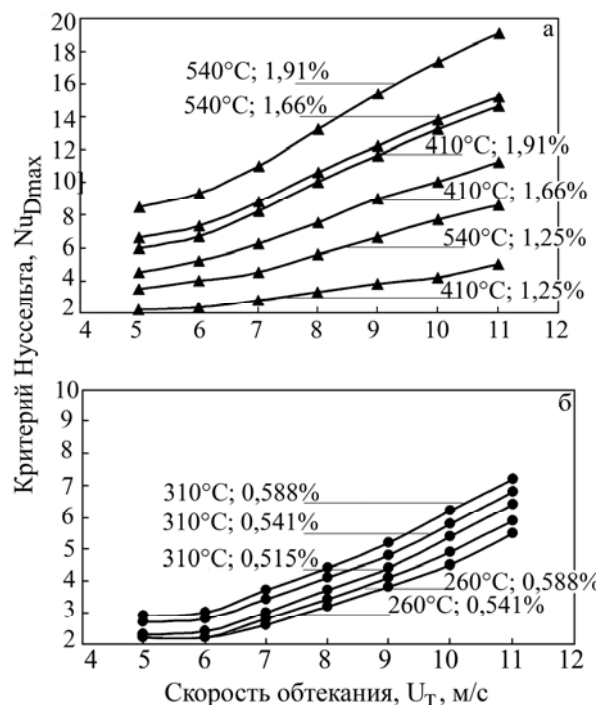


Рис. 4 Зависимость критерия Нуссельта ($Nu_{D\max}$) от скорости обтекания (U_T): а) кварцевый песок, б) железный порошок

Это также, видимо, связано с ростом скорости скольжения фаз и утончением и турбулизацией пограничного слоя газа на поверхности частиц.

Определенное влияние на интенсивность массообмена оказывает влажность обрабатываемого материала и температура рабочего газа (рис. 5).

Полученные после обработки экспериментальных данных критериальные зависимости $Nu_{D\max}=f(Re_T)$ дают возможность обобщения результатов и распространения их на другие режимы и устройства с учетом теории подобия. Еще большие возможности для обобщения и дальнейшего применения полученных результатов дает учет физических свойств газа, окружающего частицу, с помощью критерия Прандтля $Pr=v/D$.

Результаты такой обработки опытных данных приведены на рис. 6 в виде критериальной зависимости $Nu_{D\max}=f(Re_T, Pr_D)$.

Таким образом, полученные значения β и Nu_D и зависимости дают возможность рассчитать массообмен в различных точках аппарата и, в первую очередь, для зоны входа частиц, где реализуются условия, характерные практически для любого

устройства, использующего закрученный двухкомпонентный поток.

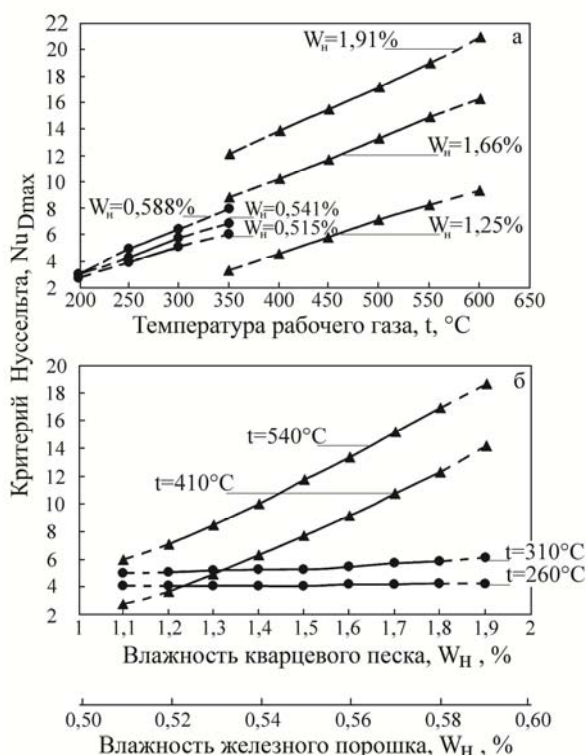


Рис. 5 Влияние влажности обрабатываемого материала и температуры рабочего газа на величину критерия Nu_{Dmax} .

Наряду с этим с практической точки зрения для конструктивных и тепловых расчетов значительный интерес представляет возможность расчета массообмена в аппаратах в целом, связь интенсивности межфазного массообмена не только с аэродинамическими и теплофизическими характеристиками газа и частиц, но и с геометрическими и режимными характеристиками аппарата.

Такие возможности открывает обобщение экспериментальных данных через $Nu_{D\Sigma}$ и $Re_{вхт}$, где число Рейнольдса рассчитывается через диаметр частицы и скорость газового потока на входе в вихревую камеру. Обработка экспериментальных данных с этих позиций позволяет получить зависимость $Nu_{D\Sigma}=f(Re_{вхт})$, а с привлечением критерия Прандтля зависимость вида $Nu_{D\Sigma}=f(Re_{вхт}, Pr_D)$, что дает возможность распространять полученные данные на вихревые аппараты, использующие газовые теплоносители других характеристик.

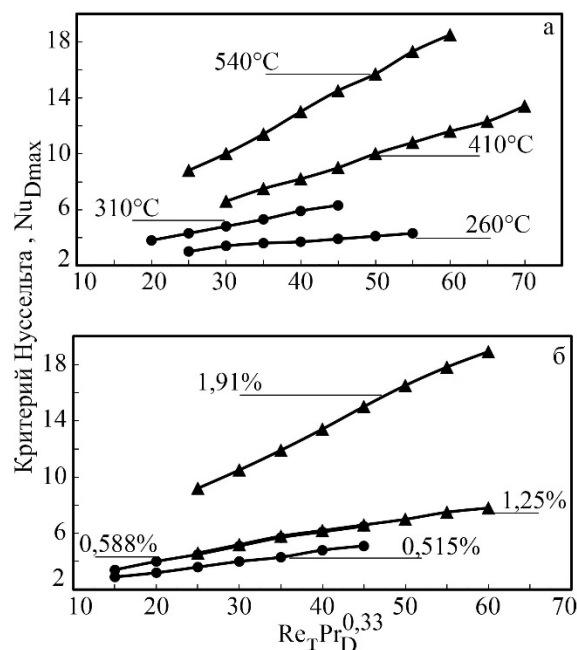


Рис. 6 Критериальная зависимость при изменении температуры газового потока t_r (а) и исходной влажности материала W_n (б)

Математическая обработка результатов позволяет получить обобщенные уравнения для расчета эффективного массопереноса пригодные для инженерной практики:

$$Nu_{Dmax} = 2 + A Re_t Pr_D^{0,33},$$

где A зависит от теплофизических свойств материала и теплоносителя. Для железного порошка A при базовом режиме составляет 0,103, а для кварцевого песка – 0,28.

Для всех исследованных режимов влияние температуры газового потока может быть учтено следующей зависимостью:

$$Nu_{D(t)} = Nu_{D(t_{баз})} + 0,025 (t_r - t_{баз}).$$

Влияние влажности учитывается зависимостью:

$$Nu_{D(w)} = Nu_{D(w_{баз})} + 17 (W - W_{баз}).$$

Полученные результаты свидетельствуют о высокой интенсивности тепломассообменных процессов в закрученном газодисперсном потоке с противоточным движением фаз что, в сочетании с процессами межкомпонентного разделения, протекающими в этом же технологическом объеме, дает возможность разработки высокоэффективных технологических процессов и компактных аппаратов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАКРУЧЕННОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

В Институте химии Дальневосточного отделения РАН разработан и реализован в промышленной практике ряд вихревых устройств для термической и химико-термической обработки сырья в химическом производстве, для обжига и сушки минерального сырья в металлургии.

Одним из возможных технических решений и примером разработанного и внедренного в практику устройства является агрегат для получения гидрофобных сорбентов. Известно, что широко используемым технологическим приемом получения материалов с заданными свойствами является нанесение на них других веществ методом адсорбции.

Например, гидрофобизация минеральных дисперсных материалов органическими веществами изменяет их свойства: насыпную плотность, текучесть, влагонасыщаемость; позволяет использовать их в качестве сорбентов для выделения органических веществ из растворов, наполнителей для композиционных строительных и автодорожных материалов и в других целях.

Природная гидрофобность, то есть несмачиваемость водой, минералов в естественных условиях представляет собой редкое явление и поэтому для удовлетворения потребностей промышленности в гидрофобных технических материалах необходима искусственная гидрофобизация. Искусственное получение водоотталкивающих свойств состоит в создании на поверхности материала тонкого слоя гидрофобизатора органической природы. Для этого требуется разработка специальных процессов и аппаратов. Энергетические, материальные и временные затраты на проведение адсорбционного процесса и качество обработки зависят от эффективности теплообмена между адсорбентом и газом в технологических аппаратах.

В известной ранее промышленной практике гидрофобизации использовались следующие варианты обработки:

- в жидком гидрофобизаторе в процессе измельчения [5, 6];
- в жидком гидрофобизаторе при нагреве и добавке поверхностно-активных веществ [7];
- в паро-газовой фазе гидрофобизатора [5];
- в газовой фазе гидрофобизатора [6].

Обзор известных технологических приемов показывает, что результаты обработки улучшаются по мере повышения дисперсности гидрофобизатора вплоть до молекулярного уровня, а, как показали наши последующие опыты, и до уровня химически активных осколков молекул. Формирование гидрофобных пленок на поверхности минеральных частиц с помощью газовой фазы гидрофобизатора целиком определяется законами адсорбции.

Рассмотрение теории адсорбции показывает, что адсорбционные силы по своей природе могут быть химическими (ионные, ковалентные, координационные связи) и физическими (Ван-дер-Ваальсовы), включающими взаимодействие молекул с постоянным диполем (вода, спирт, фенол) и молекул с индуцированным диполем, взаимодействие между неполярными молекулами и действие сил водородной связи. Для создания на частицах порошка прочных и устойчивых гидрофобных пленок необходимо использовать как те, так и другие. Кинетика адсорбционного процесса характерна тем, что элементарный акт адсорбции происходит практически мгновенно (за исключением хемосорбции) и поэтому лимитирующим фактором является интенсивность подвода адсорбтива к адсорбирующей поверхности, т.е. внешнедиффузионный для открытых поверхностей и внутридиффузионный для пористых материалов процессы. Для реальных объектов динамика адсорбции в слое или потоке материала определяется не только характером изотермы адсорбции и диффузионными характеристиками отдельных частиц, но и аэродинамическими характеристиками потока.

В связи с тем, что, единая теория, которая корректно бы описывала процесс адсорбции и его кинетику отсутствует, для определения основных закономерностей процесса гидрофобизации дисперсных материалов нами были проведены экспериментальные исследования на лабораторных установках.

Практика обработки порошка кварца, кварцево-галенитовой руды, карбонатных порошков фракций менее 0,5 мм в газовой фазе гидрофобизатора в неподвижном слое без механического перемешивания показала, что гидрофобность возникала во всех случаях, кроме опытов при естественной влажности сырья свыше 20 % по массе. В проведенных опытах были определены ориентировочные параметры температурного режима.

Обращает на себя внимание тесная связь качества обработки с исходной влажностью материала. Например, порошок кварцево-галенитовой руды, практически сухой даже без предварительной сушки хорошо обрабатывался. Влажные кварцевые пески требовали длительного высушивания.

Переход к укрупненным лабораторным установкам прежде всего связывался с поиском способа эффективного удаления с поверхности обрабатываемых частиц пленки свободной и физически связанной воды. На наш взгляд таковым является сушка дисперсных материалов в закрученных потоках теплоносителя, поэтому серия следующих опытов велась на укрупненных вихревых установках.

Проведенные эксперименты позволили определить принципы создания устройства, совмещающего сушку сырья в закрученных потоках теплоносителя с раздельным генерированием гидрофобизирующего газа.

Были проведены многочисленные экспериментальные исследования с порошковыми материалами различного происхождения и свойств, в различных тепловых режимах. Экспериментально установлено, что качество гидрофобизирующей обработки тем лучше чем более глубоко был высушен и активирован материал на первой стадии обработки, чем больше был “радикализован” гидрофобизирующий газ на начальном этапе второй стадии обработки; чем больше был охлажден материал между сушкой и гидрофобизацией. Отмечено, что “радикализация” рабочего газа позволяет существенно интенсифицировать процесс удаления влаги с поверхности частиц, что 300°C являются оптимальной температурой для развития физической адсорбции на поверхности дисперсных кварцевых материалов, а также что при достаточно интенсивных процессах десорбции влаги – адсорбции углеводородов нет необходимости в прогреве частиц на всю глубину.

Выполненные экспериментальные исследования особенностей гидрофобизации и полученных свойств различного минерального и техногенного сырья позволили разработать основные принципы технологического процесса гидрофобизации и его аппаратное оформление.

Как следует из аналитических и лабораторных исследований, наиболее перспективной представляется обработка материалов в газовой фазе гидрофобизатора. При этом основными и обязательными этапами гидрофобизирующей обработки являются: предварительная сушка, цель которой – очистка поверхности материала от воды; собственно гидрофобизация, цель которой – нанести и закрепить на поверхности материала покрытие из углеводородных соединений; охлаждение обработанного материала до температуры окружающей среды.

Для разработки оптимального технологического процесса гидрофобизации и расчета его аппаратного оформления, необходимо учитывать:

- теплообмен между материалом и газами при сушке, гидрофобизации, охлаждении;
- массоперенос между материалом и газами при сушке, гидрофобизации, охлаждении;
- физико-химические свойства обрабатываемого дисперсного материала;
- свойства газов – сушильных агентов и газов-гидрофобизаторов.

Абсолютное большинство материалов, гидрофобизировать которые есть практический смысл, относится к группе капиллярно-пористых

веществ (зола, керамзит, перлит и т.д.), особенность которых состоит в том, что они при термической обработке не меняют свойств, за исключением некоторого охрупчивания при потере влажности. Предложенная П.А. Ребиндером классификация форм влажности по порядку убывания энергии связи выделяет три формы: химическую, физико-химическую и физико-механическую.

Химическая связь характеризуется точным количественным соотношением и подразделяется на молекулярную, когда влага содержится в кристаллогидратах, и ионную (влага в виде гидроксильных ионов). Эта связь может быть разрушена при химической реакции или прокаливании, что приводит к разрушению самого вещества с характерными для этого изменениями свойств. В рассматриваемых нами процессах удаления химически связанной влаги не происходит, и в дальнейшем она не рассматривается.

Физико-химическая связь характеризуется нестрогими количественными соотношениями между материалом и влагой, зависящими от параметров внешней газовой среды (температура, влажность). При этом влага связывается с материалом за счет адсорбции молекул пара на всей твердой поверхности, а также за счет осмотического давления, вызывающего избирательную диффузию молекул воды из охлаждающей среды через полупроницаемую перегородку. Адсорбционная влага подразделяется на молекулярную и полимолекулярную которые существенно различаются своими свойствами. Максимальную энергию связи имеет первый мономолекулярный слой, а последний слой обладает наименьшей энергией связи влаги с поверхностью.

Физико-механическая связь характеризуется неопределенным количеством влаги, удерживаемой материалом за счет сил поверхностного натяжения и капиллярного давления в порах, пустотах, микро- и макрокапиллярах. Микрокапиллярами называются капилляры, в которых длина свободного пробега молекул много меньше диаметров капилляров – в них давление насыщенного пара над поверхностью мениска меньше давления насыщенного пара над открытой плоской поверхностью жидкости, поэтому возможен процесс капиллярной конденсации пара. Так как основная масса капиллярной влаги не связана с материалом физико-химическими силами, то при тепловом расчете процесса на ее удаление следует предусматривать количество энергии, равное теплоте парообразования.

Следует учитывать, что четкой границы между отдельными формами связи и видами влаги нет и они могут изменяться одна за счет другой при изменении состояния материала. Общее количество влаги, содержащееся в материале и отнесенное к единице

массы абсолютно сухого материала называют влажностью:

$$W=(G_{\text{вл}}/G_c)\cdot 100\%.$$

Довольно часто также используется понятие влажности материала:

$$W=[G_{\text{вл}}/(G_c+G_{\text{вл}})]\cdot 100\%.$$

В дальнейшем мы использовали понятие влажностности, что представляется более удобным, так как масса абсолютно сухого материала в процессе сушки остается постоянной.

В практике влажностности материалов, подлежащих гидрофобизации зависит от условий их получения и хранения, влажности атмосферного воздуха. При одинаковой 100 % влажности воздуха максимальное гигроскопическое влажностное содержание материала зависит от его свойств.

Учет отмеченных выше физико-химических особенностей исходного материала позволяет перейти к выбору газа-сушильного агента и гидрофобизатора. В обычной практике при термической обработке (сушке) дисперсных материалов в качестве теплоносителей может быть использован широкий спектр различных газов: водяной пар, воздух, топочные (дымовые) газы, азот, а также и жидкие теплоносители. Во многих случаях большие технико-экономические и технологические преимущества дает использование перегретого водяного пара [8]. Однако, при гидрофобизации из соображений специфики поверхностной обработки материала и требований к экономичности процесса следует ограничиться выбором: воздух или топочные газы.

Наиболее перспективным теплоносителем и сушильным агентом при термической обработке перед гидрофобизацией являются топочные газы. Преимущества их применения заключаются в возможности получения температур газов в широком диапазоне, простоте топочных устройств, возможности использования отходящих газов от печей, котлов и других энергоустановок. В состав топочных газов входят азот, кислород, окись и двуокись углерода, сернистый газ и водяные пары. Состав газов зависит от вида используемого топлива (соляр, мазут, нефть, уголь), а также от количества воздуха, подаваемого для сжигания топлива и разбавления продуктов сгорания до необходимой температуры, так как топливо и воздух содержат влагу и в процессе сгорания образуются молекулы воды при окислении водорода и углеводов, топочные газы содержат водяные пары. Однако, относительная влажность газов остается невысокой и процесс десорбции молекул воды с поверхности обрабатываемого материала проходит. При этом, чем выше температура продуктов сгорания, тем

эффективнее идет сушка, тем компактнее может быть установка.

Основные технологические параметры и процесс сушки могут быть рассчитаны и проанализированы с помощью I-d диаграммы влажного воздуха с незначительной погрешностью.

При гидрофобизации имеет место ряд теплообменных процессов: между газом - сушильным агентом и обрабатываемым материалом, между газом-гидрофобизатором и материалом, между двухкомпонентным потоком газ+материал и стенкой аппарата, между аппаратом в целом и окружающей средой.

Потери тепла в окружающую среду можно определить по обычному уравнению теплопередачи:

$$Q_{\text{о.с.}} = \Sigma F \cdot k \cdot \Delta t.$$

В случае негерметичности установки следует добавить к потерям и тепло, которое уходит за счет неорганизованного теплообмена.

Теплообмен между двухкомпонентным потоком и стенками аппарата также в значительной мере определяет потери тепла в окружающую среду и уровень температур в зоне сушки и зоне гидрофобизации. Аналитический расчет данного теплового потока затруднен, однако разработаны методы его расчета для ряда практических случаев.

Теплообмен между материалом и газом-гидрофобизатором, как это показали расчеты авторов, играет несущественную роль в связи с тем, что оба компонента имеют близкую температуру, а расход гидрофобизатора мал.

Определяющую роль в технологическом процессе играет межфазный теплообмен между газом-сушильным агентом и материалом - от него зависит интенсивность и качество сушки поверхности частиц, энергетические затраты на проведение процесса, технико-экономические показатели и размеры всей технологической установки. Межфазный теплообмен рассчитывается в соответствии с общими принципами.

Особенностью расчета теплообмена при гидрофобизации является то, что из рассмотрения исключается передача тепла излучением, т.к. лучистый теплообмен становится сопоставим с конвективным при температурах свыше 650°C, а при гидрофобизации максимальные температуры в зоне сушки значительно ниже.

Массоперенос в технологическом процессе гидрофобизации имеет место при испарении влаги с поверхности частиц, а также при нанесении гидрофобного покрытия, когда гидрофобизирующее вещество перемещается внутри газовой фазы, передается от газовой фазы к поверхности твердых частиц и перемещается по порам и трещинам в толще частиц обрабатываемого материала.

Исходя из имеющихся экспериментальных данных представляется, что процесс сушки-гидрофобизации включает в себя следующие макрокинетические стадии:

1. Диффузия молекул воды от пограничного с внешней поверхностью частицы слоя в ядро газового объема или потока (молекулярная и конвективная диффузия).

2. Испарение (десорбция) молекул воды с поверхности частиц в пограничный слой (массоотдача). Так как при этом движущая сила массопереноса создается путем нагрева, то в данном случае интенсивность массопереноса определяется интенсивностью теплообмена.

3. Диффузия влаги из пор, капилляров, трещин в частице к ее поверхности (массопроводность).

4. Диффузия гидрофобизирующего газа из ядра газового объема потока к внешней поверхности частиц (молекулярная и конвективная диффузия).

5. Адсорбция гидрофобизатора на поверхности частиц (массоотдача).

6. Диффузия гидрофобизатора в поры, капилляры и трещины частиц (массопроводность).

Скорость и качество обработки материалов определяются характером протекания отдельных указанных стадий процесса и их совокупностью и рассчитываются с помощью полуэмпирических зависимостей.

Изложенные методы расчета и экспериментальные исследования позволили получить методику оценки и расчета процессов предварительной сушки дисперсных материалов и собственно процесса нанесения гидрофобного покрытия. Как следует из изложенного материала для точного количественного расчета технологического процесса гидрофобизации следует провести вычисления по многочисленным полуэмпирическим зависимостям с учетом различных факторов, характеризующих свойства взаимодействующих веществ, режимные параметры процесса, конструктивные особенности аппаратов, в которых он реализуется. Эффективным способом решения этих задач является применение численных методов для проведения моделирования исследуемого процесса, уточнения влияния различных факторов, определения их оптимальных значений и соотношений.

При разработке оптимального технологического процесса гидрофобизации определяющим является обеспечение интенсивного теплообмена между материалом и газовой средой на стадиях прогрева и сушки, последующее разделение материала и газосушильного агента, содержащего удаленную влагу, и взаимодействие между гидрофобизатором и поверхностью обрабатываемых частиц. Очевидно, что решение данной задачи возможно путем применения вихревых устройств, обеспечивающих

высокую интенсивность теплообмена между твердой и газовой средами и их последующее разделение.

Общая схема разработанной типовой вихревой установки для гидрофобизации мелкодисперсных материалов представлена на рис. 7.

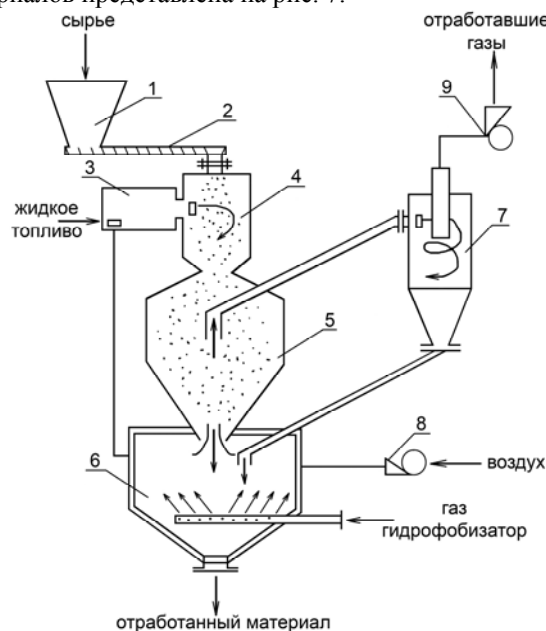


Рис. 7 Схема вихревой установки для гидрофобизации дисперсных материалов

Исходный (сырой) материал находится в бункере 1 и с помощью питателя 2 подается в рабочую зону. Питатель может быть любого типа, однако достоинствами шнекового питателя является возможность плавной регулировки количества подаваемого материала с помощью электродвигателя, а также обеспечиваемая им герметичность установки. Сырой материал через верхнюю крышку подается в рабочую зону вихревой сушильной камеры 4 и совместно с продуктами сгорания жидкого топлива, выходящими из форкамеры 3, образует гетерогенный закрученный поток, в котором происходит интенсивный теплообмен между твердой и газовой компонентами, в результате которого твердый материал прогревается и высушивается до необходимого состояния. Проходя через зону “перезима” гетерогенный поток, сохраняя в достаточной степени вращение, попадает в камеру сепарации 5, где заканчивается процесс сушки и под действием центробежных сил происходит отделение твердого материала от газов. Твердый материал попадает в пристенную область и ссыпается в камеру 6, отработавшие газы через осевой патрубок и циклон-пылеотделитель 7 дымососом 9 удаляются из

установки и после доочистки выбрасываются в атмосферу.

Уловленная циклоном мелкая фракция материала может сбрасываться также в камеру 6 и смешиваться там с основным материалом, а может и выводиться отдельно для последующего подбора оптимальных по гранулометрическому составу смесей.

В камере 6 происходит охлаждение материала и его обработка гидрофобизирующим газом путем барботирования последнего через слой материала. С точки зрения рекуперации части тепла рационально охлаждение камеры вести с помощью воздуха,

подаваемого вентилятором 8, затем на дутье в форкамеру.

Данная аппаратная схема позволяет создать высокоэффективные устройства любой производительности для различных дисперсных материалов. Для создания агрегатов под конкретные задачи необходимо рассчитать характеристики движения газа и материала, сепарацию движения частиц, межфазный тепломассоперенос, выполнить тепловой и конструктивный расчеты установки в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных расчетно-экспериментальных исследований позволили установить качественные и количественные зависимости интенсивности внутреннего межфазного массопереноса от критериев Рейнольдса и Прандтля. Эксперименты показали, что при обработке дисперсных материалов в закрученном газовом потоке создаются оптимальные условия для физико-химического взаимодействия между обрабатываемыми частицами и газом.

Опытно-промышленные исследования по реализации технологического процесса гидрофобизации позволяют разработать и успешно применить в промышленности целый ряд технологических процессов и аппаратов для гидрофобизации дисперсных материалов с различными характеристиками.

Все полученные данные могут быть использованы в дальнейшей работе при проектировании и эксплуатации вихревых аппаратов различного назначения: для сушки и гидрофобизации дисперсных материалов, для восстановительного отжига металлических порошков, для напыления термопластичных порошковых красок, для сушки формовочного песка, для переработки минерального сырья. Эмпирические зависимости позволяют повысить точность математического моделирования тепломассообменных процессов в газодисперсных потоках. Результаты эксперимента могут использоваться при решении частных производственных задач по оптимизации режимов работы технологического оборудования, использующего газодисперсные закрученные потоки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юдаков А.А., Цыбульская О.Н., Ксеник Т.В. Экспериментальное изучение внутреннего межкомпонентного теплообмена в закрученном газодисперсном потоке // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – Днепропетровск: НПВК "Триакон", 2015. - Вып.1(16) - С.3-7.
Yudakov A.A., Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V. Experimental studies of intercomponent heat exchange in swirling gas-dispersion flow with counterflow component movement // Modern science: researches, ideas, results, technologies. - Dnepropetrovsk: NPVK "Triakon", 2015. - Num.1(16) - С.3-7.
2. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: Химия, 1987. 496 с.
Planovsky A.N., Nikolaev P.I. Processes and devices of chemical and petrochemical technologies. M.: Chemistry, 1987. 496 pp.
3. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 1988. 352 с.
Mushaev V.I., Ulyanov V.M. The drying of dispersed materials. M.: Chemistry, 1988. 352pp.
4. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. М.: Теплотехник, 2011. 335 с.
Laptev A.G., Nikolaev N.A., Basharov M.M. Methods of Intensification and Modelling of Heat-and-Mass Exchange Processes. Moscow: Teplotehnik, 2011. 335 pp.
5. Мутуль А.Ф., Беляков Г.Г. Гидрофобизация минеральных компонентов строительных материалов на черных вяжущих. Рига: Изд-во Акад. наук Латв.ССР, 1955. 76 с.
Mutul A.F., Belyakov G.G. Hydrophobization of mineral components of the building materials using the black binders. Riga: Publ. by Academy of Sciences of Latvian SSR, 1955. 76 p.
6. Юдаков А.А., Зубец В.Н. Теория и практика

получения и применения гидрофобных материалов. Владивосток: Изд-во ДВО РАН, 1998. 181с.

Yudakov A.A., Zubets V.N. Theory and practice of production and application of hydrophobic materials. Vladivostok: Publ. by FEB of RAS, 1998. 181 p.

7. Манохин А.И., Резниченко В.А. Комплексное использование минерально-сырьевых ресурсов (фундаментальные основы) // И.П. Бардин и отечественная металлургия. – М.: Наука, 1983. – С.36-45.

Manokhin A.I., Reznichenko V.A. Complex use of mineral resources (fundamental principles) // I.P. Bardin and national metallurgy. – Moscow: Nauka, 1983. – P. 36-45.

8. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Теплообменные процессы в химической технологии. Л.: Химия, 1982. 228 с.

Romankov P.G., Frolov V.F. Heat-exchange processes in the chemical technology. Leningrad: Chemistry, 1982. 228 p.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$V_{вх}$ – скорость газового потока на входе в вихревую камеру, м/с;
 t_g – температура газа, °С;
 W_n – начальная влажность материала (порошка), %;
 G_n – расход порошка, кг/ч
 μ – массовая концентрация частиц в потоке, кг/кг;
 d – размер частиц, м;
 β – коэффициент массоотдачи, м/с
 $\beta_i, \beta_\Sigma, \beta_{max}$ – коэффициент массоотдачи локальный, интегральный, максимальный, м/с;
 m_T – масса частицы, кг;
 Δm_T – изменение массы частицы, кг;
 T – абсолютная температура, К
 R_n – универсальная газовая постоянная;
 F, F_T – сглаженная тепловоспринимающая поверхность частиц порошка, м²;
 $c_{пс}, c_T$ – концентрация паров воды у поверхности частицы, в объеме камеры;
 $P_{пс}, P_T$ – парциальное давление у поверхности частицы, в объеме камеры;
 $\tau, \Delta\tau$ – время, интервал времени, с;
 U_T – относительная скорость между газом и частицей, м/с;
 L – высота реакционной зоны, м

Критерии, безразмерные числа:

$Nu_D = \beta d/D$ – критерий Нуссельта диффузионный;
 Nu_{Dmax} – критерий Нуссельта диффузионный в зоне максимально интенсивного массообмена;
 $Nu_{D\Sigma}$ – критерий Нуссельта суммарный по установке;
 $Pr_D = \nu/D$ – критерий Прандтля диффузионный;
 $Re = Vd/\nu$ – критерий Рейнольдса
 $Re_{вхТ} = V_{вх} d/\nu, Re_T = Ud/\nu$

Индексы:

вх – условия входа;
г – газ;
п – порошок;
н – начальное состояние;
т – твердая компонента газодисперсного потока;
баз – базовый режим;
пс – пограничный слой;
i – локальный;
 Σ – интегральный;
max – максимальный;
о – исходное состояние;
нас – насыщение
(n) – точка замера