

Keywords: injuries, machinery for making organic fertilizer, mathematical modeling, the coefficient of safe operation.

УДК 66.061:569.21

В. В. ШМЕЛЬКОВ, аспирант, НТУ «ХПИ»;

В. Ф. РАЙКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;

М. А. ЦЕЙТЛИН, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕДАНИЯ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ, СОПРОВОЖДАЮЩЕЕСЯ ЕЕ РАСТВОРЕНИЕМ

Рассмотрен процесс осаждения частицы в жидкости под действием сил гравитации, сопровождающийся ее растворением. Получено уравнение для расчета скорости и глубины осаждения в произвольный момент времени. Найдено, что оседающая частица движется равнозамедленно с ускорением, зависящим от скорости растворения. Уравнение преобразовано для расчета коэффициента скорости растворения по результатам эксперимента.

Ключевые слова: осаждение, растворение, коэффициент скорости растворения, математическое моделирование

Введение. Растворение твердых веществ в воде – процесс достаточно широко распространенный в ряде отраслей, в частности, пищевой и химической промышленности, а также энергетике. В большом разнообразии предложенных для этого устройств значительное место принадлежит аппаратам, в которых растворяемый материал находится во взвешенном состоянии в восходящем токе растворителя [1]. Кинетика растворения в этих аппаратах определяется скоростью скольжения растворяемого материала относительно растворителя, которая зависит от структуры потока и физико-химических свойств растворителя, а также геометрии растворяемых частиц и силы гравитации [2]. Последняя является константой и может быть исключена из состава факторов. При ламинарном течении жидкости в солерастворителе структура потоков также оказывает весьма незначительное влияние на скорость скольжения и эту величину можно практически приравнять к скорости осаждения растворяемого вещества в растворителе. Таким образом, скорость осаждения частиц оказывается определяющим фактором, как в исследовании кинетики растворения, так и в расчете и проектировании солерастворителей с восходящим током растворителя.

Цель работы. Настоящая статья посвящена математическому описанию осаждения твердой частицы, которое сопровождается ее растворением и разработке на этой основе методики экспериментального определения коэффициента скорости растворения.

Обсуждение результатов. Математическому моделированию растворения твердых веществ в жидкостях посвящена обширная литература и, в том числе, ряд монографий, среди которых следует особо отметить работы [2] и [3]. Методы разработки моделей рассматриваемого процесса можно подразделить на две группы. В первой из них используют теоретические или экспериментальные данные о кинетике растворения одиночных сферических частиц или монодисперсной системы сферических частиц, функции распределения частиц полидисперсного материала по размерам и структуре потока растворителя в рассматриваемом аппарате.

В основе методов второй группы лежит понятие кинетической функции – зависимости доли нерастворившегося компонента от безразмерного времени при

постоянных концентрации и температуре. Следует отметить, что модели этой группы базируются на данных, полученных по результатам опытов в периодическом режиме с использованием сырья и растворителя, аналогичных тем, что будут использоваться в промышленных установках. Это в значительной степени ограничивает общность получаемых результатов. Поэтому при разработке математической модели оседания растворяющейся частицы исходили из идеологии первой из перечисленных групп.

Математическую модель, описывающую скорость и глубину оседания частицы, подвергающейся растворению, можно получить путем нахождения зависимости размера частицы от времени оседания и кинетики ее растворения. При нахождении такой зависимости были приняты следующие допущения.

Наличие диффузионного потока растворяемого вещества в пленке вокруг оседающей частицы не меняет скорости осаждения.

Скорость осаждения пропорциональна определяющему размеру частицы.

Коэффициент скорости растворения в процессе оседания частицы не изменяется.

Изменение концентрации раствора за счет растворения частицы в процессе оседания пренебрежимо мало и не влияет на кинетику процесса.

Силы, связанные с инерцией растворяемой частицы, пренебрежимо меньше ее веса.

Растворяемые частицы имеют сферическую форму.

То, что допущение 2 не искажает реальной картины процесса, можно видеть, анализируя данные работы [4], авторами которой изучалось оседание кристаллов хлорида натрия, полученных по различным технологиям. Было показано, что в интервале размера частиц от 0,1 до 6 мм скорость их оседания с приемлемой точностью может считаться прямо пропорциональной определяющему размеру.

Допущение 3, во всяком случае, при относительно небольших изменениях определяющего размера частицы, можно обосновать следующим анализом. Как известно из теории процесса растворения [5], для частицы, обтекаемой потоком жидкости, зависимость критерия Нуссельта (Nu) от критериев Прандтля (Pr) и Рейнольдса (Re) имеет вид:

$$Nu = A Pr^{1/3} Re^{1/2}, \quad (1)$$

где A – коэффициент пропорциональности.

Из уравнения (1) можно найти, что коэффициент скорости растворения (k_p) пропорционален корню из отношения скорости обтекания (в нашем случае – скорости оседания) к диаметру частицы. Но в соответствии с допущением 2 между этими величинами существует прямая пропорциональность, а, следовательно, $k_p = \text{const}$.

Искомая модель представляет собой очевидный интеграл:

$$L_{i\bar{n}} = \int_0^{\tau_{i\bar{n}}} w \, d\tau \quad (2)$$

где L_{oc} – глубина, на которую опустилась частица в процессе осаждения, м; τ – текущее значение времени, с; τ_{oc} – время оседания, с.

Для нахождения необходимой для интегрирования уравнения (2) зависимости скорости оседания w от времени обратимся к уравнению кинетики растворения [2]

$$dg = k_p S(C^* - C) \cdot d\tau, \quad (3)$$

где g – масса растворившейся соли, кг; k_p – коэффициент скорости растворения, м/с; C и C^* – концентрации соли в растворе текущая и при насыщении, соответственно, кг/м³; S – суммарная поверхность кристаллов соли, м²; τ – время протекания процесса растворения, с.

В соответствии с допущением 6 можно записать следующие равенства $g = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho$, $dg = \frac{1}{2}\pi d^2 \rho dd$ и $S = \pi d^2$. После подстановки их в уравнении (3) и сокращений получим:

$$dd = -2 \frac{k_p}{\rho} (C^* - C) d\tau, \quad (4)$$

где ρ – плотность кристаллов хлорида натрия (2162 кг/м³).

Заменяя, с учетом допущения 2, в уравнении (4) dd на dw , где a – коэффициент пропорциональности (например, по данным работы [4] для выварочной соли с размером частиц от 0,1 до 0,8 мм при осаждении в аммиачном конденсате, не содержащем хлорида натрия при температуре 23 °С, $a = 0,0092$, в насыщенном растворе хлорида натрия $a = 0,0139$), получим зависимость скорости оседания частицы от времени протекания этого процесса в интегральном виде

$\int_{w_0}^w dw = -\frac{2k_p}{a\rho} (C^* - C) \int_0^{\tau_{oc}} d\tau$, откуда после интегрирования находим:

$$w = w_0 - \frac{2k_p}{a\rho} (C^* - C) \tau_{oc} \quad (5)$$

где w_0 – скорость оседания частицы с исходным размером d_0 .

Теперь, подставляя (5) в (2), после интегрирования получим:

$$L_{oc} = w_0 \tau_{oc} - \frac{k_p}{a\rho} (C^* - C) \tau_{oc}^2 \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) легко видеть, что в процессе оседания в ненасыщенном растворе частица движется равнозамедленно, причем отношение $k_p(C^* - C)/a\rho$ представляет собой ускорение, с которым растворяющаяся частица тормозится в результате растворения и уменьшения веса. В частности, сравнивая эту величину с ускорением свободного падения можно оценить справедливость допущения 5.

Для целей изучения кинетики растворения из уравнения (6) можно получить формулу для расчета коэффициента скорости растворения k_p , по результатам измерения времени оседания растворяемого вещества до заданной глубины L_{oc} :

$$k_p = \frac{a\rho(w_0 \tau_{oc} - L_{oc})}{(C^* - C) \tau_{oc}^2} \quad (7)$$

Анализируя вид уравнения (7) можно заключить, что на точность определения k_p существенное влияние оказывает точность определения скорости оседания w_0 , которую можно рассчитать для каждого случая пользуясь результатами соответствующих исследований [6] с корректировкой по вязкости и плотности раствора., Указанные физические свойства сложных растворов рассчитываются по

методикам описанным, например (применительно к растворам, используемым в технологии содового производства), в [7]. Следует, однако, отметить Возможные относительные ошибки таких расчетов, достигают 10 %, что сказывается на точности расчета w_0 . Поэтому с целью исключения влияния ошибки в расчете w_0 на результаты экспериментального определения k_p величину последнего целесообразно рассчитывать, по двум замерам, сделанным в одном опыте. А именно: времени достижения оседающего и растворяемого при этом вещества $1/2$ длины измерительного сосуда (далее – $\tau_{1/2}$) и времени достижения его дна – τ_{oc} .

Уравнение для расчета коэффициента скорости растворения получается путем решения относительно w_0 уравнения аналогичного (6) с подстановкой в него $L_{1/2}$ и $\tau_{1/2}$ вместо L_{oc} и τ_{oc} и, затем, подстановкой полученного значения w_0 в (7). В результате получается следующая формула:

$$k_p = \frac{a\rho \left(L_{1/2} \frac{\tau_{oc}}{\tau_{1/2}} - L_{oc} \right)}{(C^* - C)(\tau_{oc}^2 - \tau_{oc}\tau_{1/2})} \quad (8)$$

Проверку адекватности полученного описания оседания растворяющейся частицы проводили по двум показателям. Во-первых, было оценено соответствие экспериментальной глубины оседания частиц предсказанию по уравнению (6) и, во-вторых, определена зависимость ошибки коэффициента скорости растворения, рассчитанного по уравнению (8), от размера частицы и температуры.

Выбор растворяемого вещества и растворителя определялся технологией, в рамках разработки которой выполнялось данное исследование. Изучалось осаждение кристаллов хлорида натрия (выварочной соли), в аммиачном конденсате содового производства следующего состава: общая мольная концентрация аммиачных соединений в пересчете на NH_3 – 5,1 моль/дм³, углеаммонийных соединений в пересчете на CO_2 – 1,62 моль/дм³. Изначально раствор хлорида натрия не содержал. Для опытов использовалась термостатированная стеклянная трубка длиной 2 м и диаметром 50 мм. В заполненную раствором трубку всыпали навеску кристаллов NaCl узкого фракционного состава, выделенного путем отсева. Измеряли время продвижения фронта оседающих частиц (самых крупных во фракции) до заданной в опыте метки. В предварительных опытах было

установлено, что скорость оседания навески массой менее 0,5 г не зависит от массы навески, то есть ее можно считать равной скорости оседания отдельных кристаллов.

В опыте по оценке соответствия пути, пройденного оседающими частицами, предсказанию по уравнению (6) измерялось время достижения фронтом оседающих частиц фракции 0,16-0,25 мм меток, расставленных на трубке с интервалом 200 мм. Результаты

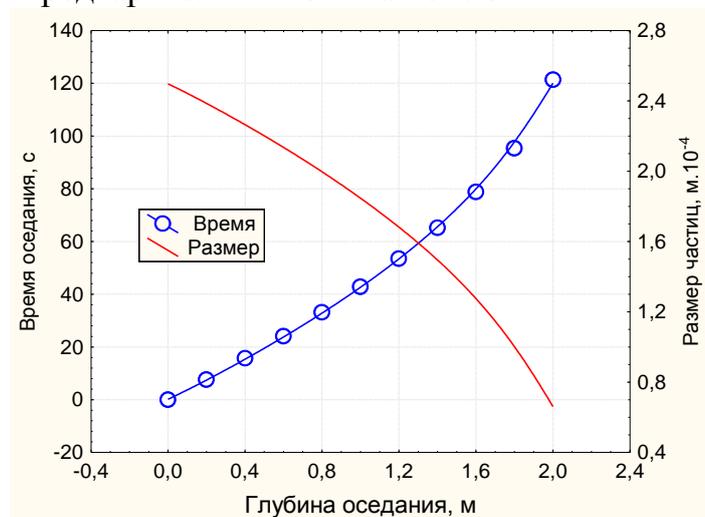


Рис. 1 – Зависимость времени оседания частиц растворяющейся соли и их размера от глубины оседания

представлены на графике рис. 1.

Как видно из графика линии (расчет глубины оседания по уравнению (6), а размера частиц по (4)) достаточно точно проходят по точкам (эксперимент). Некоторые отклонения наблюдаются лишь в области, где размеры частиц снижаются до менее чем 0,1 мм, то есть попадают в область, находящуюся за пределами приемлемости допущения 2. Хотя, как видно из рисунка, существенной ошибки в описание оседания частицы с одновременным растворением с помощью уравнения (6) это не вносит и можно считать, что данное уравнение адекватно описывает моделируемый процесс. Подтверждением тому служит также коэффициент корреляции между расчетом и экспериментом, равный 0,99.

Для оценки точности определения коэффициента скорости растворения по уравнению (8) было проведено по 5 опытов при температуре 40 °С с фракциями соли, максимальный размер частиц в которых составлял 0,125, 0,16, 0,25, 0,315 и 0,4 мм. Состав конденсата был тот же, что и в опыте, представленном на рис. 1. В опытах измерялось время достижения фронтом оседающих частиц середины трубки и ее нижнего конца. По полученным результатам с использованием формулы (8) были рассчитаны значения k_p их средние значения и среднеквадратические отклонения (СКО) определения величины k_p . Результаты в виде графика отношения

СКО к среднему значению k_p приведены на рис. 2. Из него видно, что при комнатной температуре в рамках данной методики и длины трубки, используемой для эксперимента, коэффициент скорости растворения можно с приемлемой точностью определить только для частиц с размером не более 0,315 мм. Причина такого ограничения в том, что с увеличением размера частицы уменьшается время оседания частиц и относительное

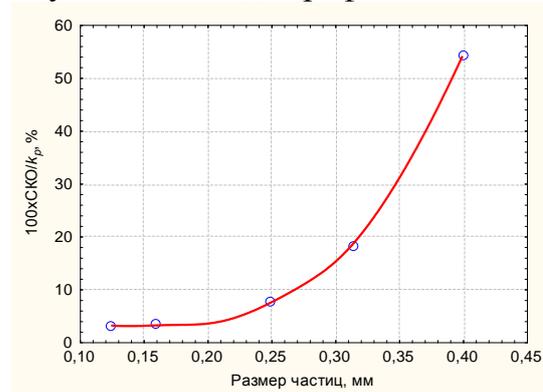


Рис. 2 – Зависимость СКО/ k_p от размера частиц

изменение их определяющего размера. Как следствие, растет относительная ошибка измерения времени оседания, что и приводит к снижению точности определения k_p .

Анализируя уравнение (8) можно предположить, что точность определения коэффициента скорости растворения k_p будет тем выше, чем при прочих равных больше разность между временем осаждения до нижнего конца трубки и – то же до ее середины – $\tau/2$. Как можно видеть из уравнения (6) эта разность тем больше, чем больше величина комплекса $(C^* - C)k_p/a$, определяющего величину ускорения, с которым частица замедляется в результате растворения и уменьшения в размере. Из этого следует, что точность экспериментального определения k_p будет расти с увеличением разности концентраций хлорида натрия в насыщенном растворе и в примененном в опыте и будет максимальной при использовании раствора не содержащего NaCl. Кроме того, точность будет расти с ростом величины отношения k_p/a , в котором обе величины зависят от температуры.

Оценим эту зависимость. Коэффициент скорости растворения хлорида натрия растет с увеличением температуры, причем, например при растворении соли в аппарате с мешалкой k_p при подъеме температуры от 40 до 80 °С, как можно судить по материалам работы (7), увеличивается примерно в 2 раза. Величина

коэффициента a также растет с ростом температуры обратно пропорционально вязкости. За счет этого в интервале 40-80 °С величина a увеличивается 1,3 раза. Таким образом, отношение kr/a растет с температурой, что должно вызвать рост точности определения kr для частиц большего размера.

Для проверки этого предположения была экспериментально оценена точность определения kr для частиц с определяющим размером 0,4 мм при температуре 80 °С. Действительно, найденная при этом относительная величина СКО для kr снизилась с 54 (см. рис. 2) до 30 %, что при 5-6 параллельных опытах может дать удовлетворительную точность значения kr .

Выводы. Таким образом, математическая модель движения оседающей частицы в процессе растворения в виде уравнения (6) адекватно описывает моделируемый процесс. Построенная на ее основе методика экспериментального определения коэффициента скорости растворения по уравнению (8) позволяет получать достаточно точные результаты при условии соблюдения определенных требований по температуре габаритам опытной установки и размеру испытываемых частиц твердого материала.

Список литературы: 1. Фурман, А. А. Поваренная соль. Производство и применение в химической промышленности [Текст] // А. А. Фурман, М. П. Бельды, И. Д. Соколов. – М.: Химия, 1989. – 272 с. 2. Аксельруд, Г. А. Растворение твердых веществ [Текст] // Г. А. Аксельруд, А. Д. Молчанов. – М.: Химия, 1977. – 272 с. 3. Вигдорчик Е. М. Математическое моделирование непрерывных процессов растворения [Текст] // Е. М. Вигдорчик, А. Б. Шейнин – Л.: Химия, 1971. – 248 с. 4. Шмельков В. В. Кинетика осаждения кристаллов хлорида натрия в жидкостях содового производства [Текст] // В. В. Шмельков, В. Ф., Райко, М. А. Цейтлин / Вісник Національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП», 2013. – № 70 (1043). – С. 164-170. 5. Лойняцкий Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойняцкий – М.: Наука, 1973. – 847 с. 6. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов [Текст] // П. А. Коузов. – Л.: Химия, 1987. – 264 с. 7. Ткач Г. А. Производство соды по малоотходной технологии [Текст] // Г. А. Ткач, В. П. Шапоров, В. М. Титов – Харьков: ХГПУ, 1998. – 429 с. 8. Цейтлин М. А. Равновесие и кинетика растворения натрия хлорида в растворе аммиака и аммонийных солей карбонатной кислоты [Текст] // М. А. Цейтлин, В. В. Шмельков, В. Ф. Райко / Інтегровані технології та енергозбереження / щоквартальний наук. практичн. журнал – Харків: НТУ «ХП», 2011. – № 4. – с. 36–40.

Поступила в редколлегию 25.11.2013

УДК 66.061:569.21

Математическое моделирование оседания твердой частицы, сопровождающееся ее растворением / Шмельков В. В., Райко В. Ф., Цейтлин М. А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. - № 70 (1043). – С.149-154. – Бібліогр.: 8 назв.

Розглянуто процес осадження частинки в рідині під дією сил гравітації, який супроводжується її розчиненням. Отримано рівняння для розрахунку швидкості і глибини осідання в довільний момент часу. Знайдено, що частинка яка осідає рухається рівноповільнено з прискоренням, що залежить від швидкості розчинення. Рівняння перетворено для розрахунку коефіцієнта швидкості розчинення за результатами експерименту.

Ключові слова: осадження, розчинення, коефіцієнт швидкості розчинення, математичне моделювання.

The process of precipitation in the liquid under the influence of gravitational forces, accompanied by its dissolution was examined. The equation for calculating the speed and depth of subsidence at any given time was obtained. It was found that settling particle moves with constant slow down with acceleration

that depends on the rate of dissolution. Equation was transformed to calculate the coefficient of the rate of dissolution by the results of the experiment.

Keywords: precipitation, dissolution, constant of dissolution rate, mathematical modeling

УДК 665.36

А. О. НЕТРЕБА, аспірант, НТУ «ХП»;

Ф. Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП»;

ВОЛОКНИСТІ ФІЛЬТРУЮЧІ МАТЕРІАЛИ В ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИСТКИ ЖИРІВ

В статті встановлена можливість повторного використання волокнистих фільтруючих матеріалів при виробництві олій, щодо вдосконалення процесу вінтеризації. Досліджено якість та швидкість фільтрації соняшникової олії після регенерації фільтрів Петрянова. Також визначені якісні показники олії після застосування регенерованих фільтрів.

Ключеві слова: волокнисті фільтруючі матеріали, соняшникова олія, воскоподібні речовини, швидкість фільтрації.

Вступ. В олійно-жировій промисловості значне місце відводиться конкурентоспроможності продукції, що випускається, яка визначається її якістю, собівартістю і екологічною безпекою. Тому існує необхідність використання високоефективних екологічно чистих технологій і виробництв.

У виробництві олії важливе значення мають не тільки її фізико-хімічні показники, але і товарний вигляд, який визначається ступенем її прозорості, яка залежить від присутності в ній воскоподібних речовин. Як відомо, віск при зберіганні олії кристалізується, утворюючи так звану "сітку", що викликає помутніння олії, яке значно погіршує її товарно-споживчі властивості. Застосовувана за кордоном і на вітчизняних підприємствах технологія виведення воскоподібних речовин із соняшникової олії – технологія "виморожування" – характеризується низькою ефективністю, пов'язаною з тривалістю процесу кристалізації воску, низькою продуктивністю в процесі фільтрації, великими енерговитратами, недостатнім ступенем виведення воскоподібних речовин і утворенням значної кількості олієвмісних відходів [1 – 3].

Тому проблема вдосконалення технології виведення воску є актуальною.

Мета роботи. Метою роботи є визначення можливості повторного використання волокнистих фільтруючих матеріалів – фільтрів Петрянова. Також є необхідність перевірення фільтруючої здатності таких матеріалів затримувати полярні супутні речовини і домішки, які розчинні в олії, після регенерації. Зважаючи на особливі властивості волокнистих фільтруючих матеріалів (фільтри Петрянова), а саме наявність на робочій поверхні електричних зарядів, визначити вплив регенерації на ефективність фільтрації воскоподібних речовин.

Матеріали та результати досліджень. Найбільші складнощі виникають при видаленні воску методом фільтрації. Розділення неоднорідних систем рідина-тверді часточки (суспензії) можливе при використанні спеціальних фільтруючих перегородок, які пропускають рідку фазу (олію) і затримують тверду (віск). Та не всі фільтруючі тканини здатні затримати найменші часточки суспензії [4].

Процес фільтрації на стадії рафінації соняшникової олії – вінтеризації – ускладнюється із-за швидкого засмічення фільтрів воском, який буквально обволікає