

Министерство образования Украины
Государственный университет "Львовская политехника"

На правах рукописи

Осман Атыя Эль-Хабиб

УДК 66.015.23:541.12.013

**Массообмен при физическом и химическом
растворении твердых тел в условиях вакуума**

Специальность 05.17.08 - процессы, машины и аппараты
химических и нефтеперерабатывающих производств

Автореферат
диссертации на соискание научной степени
кандидата технических наук

Львов-1995



00778153 (V)

Дисертацій я

Работа выполнена на кафедре химической экологии Государственного университета Львовская политехника

Научный руководитель -доктор технических наук, профессор
Гумницкий Ярослав Михайлович

Официальные оппоненты -доктор технических наук, профессор
Статюха Геннадий Алексеевич,
кандидат технических наук
Малеванный Мирослав Степанович

Ведущая организация -Государственный Научно-исследовательский институт галургии, г.Калуш

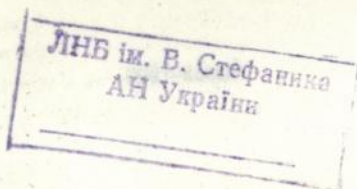
Защита состоится "30" 06 1995 года в 15⁰⁰ час. на заседании специализированного ученого совета Д 04.06.08 при Государственном университете "Львовская политехника" по адресу: 290646, г.Львов-13, пл. Св.Юра 3/4, корп. 8, ауд. 339.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного университета "Львовская политехника" по адресу: г.Львов-13, ул. Профессорская, 1.

Автореферат разослан "29" 05 1995 г.

Ученый секретарь специализированного
ученого совета Д 04.06.08
доктор химических наук, профессор

В.М. Жизневский



Общая характеристика работы

Актуальность темы. Процессы растворения находят широкое применение в химической, пищевой, гидрометаллургической, цветной и других отраслях промышленности. Полное растворение сопровождается исчезновением твердой фазы, при этом поверхность уменьшается, а время растворения увеличивается. Проблема ускорения процесса растворения является весьма важной и достигается применением различных средств, интенсифицирующих процесс.

Большой сложностью отличается химическое растворение, особенно, когда оно сопровождается образованием побочных фаз (твердой или газообразной). В случае процесса с газообразованием выделяющиеся пузырьки газа с одной стороны воздействуют на пограничный диффузионный слой жидкости, увеличивая коэффициент массоотдачи, а с другой - экранируют поверхность от доступа жидкого реагента.

Рассмотрение основных методов интенсификации (ускорение потока жидкости, механическое перемешивание, создание кипящего слоя и др.) показывает, что весьма часто достижение необходимой степени интенсификации связано со значительными энергетическими затратами.

Исследуемый в работе метод физического и химического растворения твердых неорганических и органических соединений в условиях вакуума позволяет за счет выделяющейся паровой фазы значительно ускорить растворение. При этом удаление части растворителя приводит к более высокой концентрации раствора, например, хлорида калия в производстве калийных удобрений, что уменьшит энергетические затраты на последующую стадию выпаривания. Однако до настоящего времени ни в теоретическом плане, ни практически процессу растворения под вакуумом не уделялось внимания. Поэтому постановка и экспериментальное исследование метода интенсификации созданием в системе вакуума является своевременным и актуальным.

Работа соответствует научному направлению кафедры химической инженерии и промышленной экологии "Исследование процессов массообмена в системах с твердой фазой". Диссертационная работа выполнялась по координационному плану Министерства образования Украины по проблеме "Разработка безотходных технологий химических производств" (№ госрегистрации 0194U029545).

Цель работы: теоретическое и экспериментальное исследование массообмена при физическом и химическом растворении твердых неорганических и органических соединений в условиях вакуума; установление кинетических закономерностей данного процесса.

- установлены кинетические закономерности процессов физического и химического растворения в условиях вакуума на примере растворения единичных частиц из гипса, бензойной кислоты, хлорида калия и карбоната кальция;
- обосновано определение пульсационной компоненты скорости на основании теории локальной изотропной турбулентности;
- обоснован метод применения вакуума для идентификации области протекания процесса в случае химического растворения с газообразованием;
- изучен процесс растворения сульфата кальция в слое под вакуумом и разработана математическая модель процесса;
- решена задача теплообмена при химическом взаимодействии и найдены расчетные зависимости для определения температуры в зоне реакции;
- установлены закономерности процесса растворения крупных твердых объектов хлорида натрия в условиях вакуума.

Практическая ценность работы заключается в применении вакуума для интенсификации процессов физического и химического растворения. Установлены критериальные зависимости для расчета коэффициента массоотдачи. Разработаны математические модели, позволяющие определить технологические параметры процесса. Предложен алгоритм расчета аппарата для растворения в условиях вакуума. Приведена энергетическая оценка метода растворения в вакууме. Результаты работы могут быть использованы научно-исследовательскими и проектными организациями при проектировании узлов растворения. Работа апробована на АТ "Галичфарм" на узле растворения хлорида натрия.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на международной конференции по химической инженерии (Польша, Краков, стр.-319, 1994), региональной конференции "Состояние и перспективы развития химии и химической технологии в Западных областях Украины" (Львов, стр.-106, 1994), научно-практических конференциях Государственного университета "Львовская политехника" (1993-94 г.г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 2 работы, из них 1 тезисы докладов.

Выносимые на защиту положения:

- применение вакуума как средства интенсификации процессов растворения твердых веществ;
- кинетические закономерности физического и химического растворения в вакууме;
- применение вакуума как метода идентификации диффузионной или кинетической области при химическом растворении твердых тел, сопровождающемся газовыделением.

- математическую модель процесса растворения твердых тел в слоевых аппаратах;
- энергетическую оценку метода применения вакуума для интенсификации процессов растворения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 140 страницах машинописного текста, включает 22 рисунка и 9 таблиц. Список литературы насчитывает 120 источников.

Основное содержание работы

В первом разделе приведен анализ современного состояния массообмена в системе твердое тело - жидкость на основании обзора литературы. Рассмотрены методы интенсификации массообмена, среди которых выделен метод введения инертного газа в систему твердое тело - жидкость, как аналог процесса вакуумирования, вызывающего кипение жидкости. Анализируются процессы химического растворения, сопровождающиеся газовыделением, служащие также аналогами растворения при вакууме.

Во втором разделе приводятся результаты исследования массообмена при физическом растворении единичных закрепленных тел в условиях вакуума.

В качестве объектов для исследования физического растворения были выбраны гипс, бензойная кислота, хлорид калия и хлорид натрия. Все вещества имеют диффузионную природу растворения и их растворение широко используется в промышленной практике. Названные соединения охватывают широкий спектр растворимости: от труднорастворимого (гипс) до хорошо растворимых (хлориды натрия и калия).

Значение коэффициента массоотдачи β для труднорастворимых веществ находилось из основного уравнения массоотдачи, записанного в интегральной форме

$$\Delta M = \beta F (C_s - C) \tau, \quad (1)$$

(применяемые в работе обозначения приведены на стр. 15)

В случае хорошо растворимых веществ происходит уменьшение поверхности растворения F . Кроме того при кипении раствора уменьшается его температура, что для хорошо растворимых веществ приводит к уменьшению растворимости. Аппроксимировав концентрацию $C_s(T)$ в виде многочлена

$$C_s(T) = C_{s0} + b_1 T + b_2 T^2, \quad (2)$$

а также выразив изменение температуры жидкости в виде функции времени растворения τ , интегрировали дифференциальное уравнение массоотдачи и находили выражение для определения β :

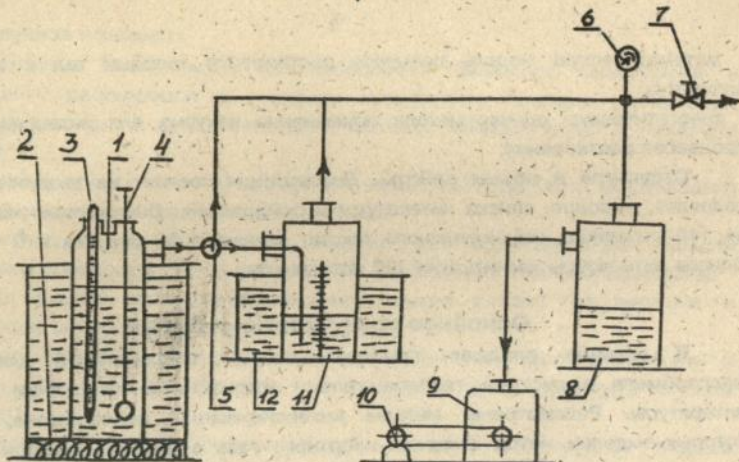


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования растворения под вакуумом.

$$\beta = \frac{3(\sqrt{M_0} - \sqrt{M})}{\pi \left(\frac{6}{\pi \rho_T} \right)^{2/3} (A_0 \tau + A_1 \frac{\tau^2}{2} + A_2 \frac{\tau^3}{3})} \quad (3)$$

Экспериментальные исследования проводились на установке, приведенной на рис. 1. Установка состоит из реактора 1, который помещался в термостат 2 с целью поддержания первоначальной температуры. Реакционный сосуд через вакуумную линию соединяли с конденсатором 11. Несконденсированные газы откачивались вакуум-насосом 9 через буферную емкость 8. Твердая частица 4 на определенное время τ погружалась в кипящую жидкость. Взвешиванием находилась потеря веса частицы и по формулам (2) или (3) рассчитывался коэффициент массоотдачи β .

В работе приводится сравнение полученных результатов с массообменом в условиях естественной и вынужденной конвекции. По сравнению с естественной конвекцией величина β в условиях растворения в вакууме на 3-4 порядка выше. Сравнение опытных результатов с массообменом при вынужденной конвекции в условиях обтекания твердой частицы потоком жидкости во взвешенном состоянии показывает, что наши результаты соответствуют самым высоким значениям β , полученным при растворении в условиях вынужденной конвекции. Результаты опытов свидетельствуют о высокой степени интенсификации в условиях вакуума. Наиболее близким аналогом данного процесса является довольно хорошо изученный процесс растворения при барботировании инертного газа через жидкость.

Используя метод локальной изотропной турбулентности, нами оценена пульсационная компонента скорости реакции v_f при перемешивании выделяющимся паром

$$v_f = \sqrt[3]{\varepsilon L}, \quad (4)$$

где ε - удельная энергия диссипации;
L - масштаб пульсации.

Величина ε находилась как общая энергия E, отнесенная к единице массы жидкости M, а общая энергия пара равна произведению расхода паровой фазы V_C на разность давлений Δp . Секундный расход пара V_C находился из теплового баланса системы

$$V_C \rho \Delta T = V_C \rho_B \tau,$$

а величина $\Delta p = \rho g H$.

В конечном итоге значение V_f оценивалось

$$V_f \approx \sqrt[3]{W_B g L},$$

а характеризующее гидродинамику число Рейнольдса имеет вид

$$Re_* = \frac{\sqrt[3]{W_B g L} \cdot d}{\nu}. \quad (5)$$

Выполненная при помощи ЭВМ аппроксимация полученных значений $Sh/\sqrt[3]{Sc} = f(Re_*)$ позволила получить уравнение в обобщенных переменных, описывающее физическое растворение единичных частиц:

$$Sh = 5.2 \cdot 10^{-5} Re_*^{1.5} Sc^{0.22} \quad (6)$$

Высокий показатель степени при числе Re_* свидетельствует о существенном вкладе гидродинамики в процессе растворения в условиях вакуума.

Третий раздел посвящен исследованию массообмена при химическом растворении твердых тел, сопровождающимся газообразованием в условиях вакуума. Рассматриваются только диффузионно-контролируемые химические взаимодействия.

В случае образования жидких продуктов реакции влияние вакуума на массообмен будет таким же, как и при физическом растворении. Выделение газообразной фазы на поверхности твердого тела существенно влияет на скорость массообмена, поскольку выделяющиеся пузырьки газа непосредственно воздействуют на пограничный диффузионный слой. Выделение газообразной фазы может происходить только при условии

$$C_{га} > C_{г}^*$$

Концентрация газа на поверхности $C_{гп}$ связана с концентрацией реагента. Для данной концентрации $C_{гп} = \text{const}$. Равновесная концентрация газа в жидкости

$C_{г}^*$ является функцией температуры и давления. С уменьшением давления значение $C_{г}^*$ уменьшается, а движущая сила процесса $(C_{гп} - C_{г}^*)$ увеличивается.

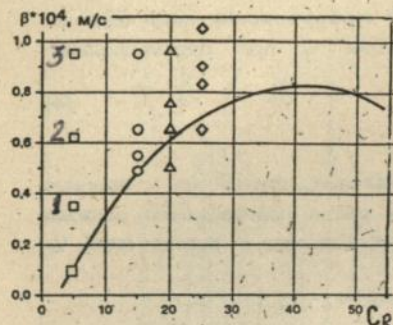
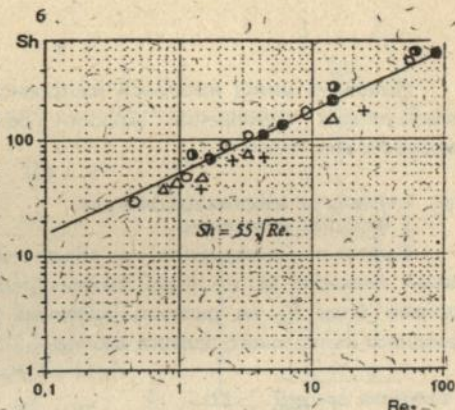


Рис. 2. Зависимость коэффициента массоотдачи β от концентрации соляной кислоты C_R . Сплошная кривая - литературные данные; точки - полученные нами значения: нижние точки соответствуют атмосферному давлению, верхние - различным величинам вакуума (1-0.2; 2-0.4; 3-0.6 $\cdot 10^5$ Па).
 Рис. 3. Обобщение опытных результатов по химическому растворению карбоната кальция в соляной кислоте в условиях вакуума (обозначения соответствуют рис.2).



Степень интенсификации оценивали по коэффициенту массоотдачи β . Объектом исследования являлось взаимодействие шарообразных частиц карбоната кальция с соляной кислотой. Исследования проводились в условиях свободной конвекции, когда перемешивание осуществлялось только выделяющимся газом.

Характерным для данного процесса является то, что интенсификация наблюдается не только при кипении раствора, но и при невысоких разрежениях, когда кипение не происходило. На рис. 2 приведено значение коэффициента массоотдачи β в зависимости от концентрации реагента C_R в области пузырькового режима газообразования. Сплошная линия построена на основании литературных данных при атмосферном давлении. Точки - экспериментальные данные, полученные при различном разрежении в системе. С увеличением разрежения точки располагаются выше, что свидетельствует об интенсификации химического растворения в условиях вакуума.

Экспериментальные результаты массообмена в системе твердое тело - жидкость, сопровождающегося газообразованием, для большого количества систем при атмосферном давлении обобщены критериальной зависимостью

$$Sh = 55 \sqrt{Re}, (Sc < 300) \quad (7)$$

в которой

$$Sh = \frac{\beta R}{D} \text{ - число Шервуда; } Sc = \frac{\nu}{D_2} \text{ - число Шмидта;}$$

$$Re_r = \frac{\rho_r C_{s1}^2}{\rho_r \nu} \text{ - модифицированное число Рейнольдса;}$$

Влияние вакуума на гидродинамику учитывается плотностью газа в числе Рейнольдса. С уменьшением давления ρ_r уменьшается, а число Re_r увеличивается. На рис. 3 сплошная линия соответствует уравнению (7), а точки - экспериментальным результатам, полученным в условиях вакуума. Наблюдается удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с теоретической линией (среднеквадратическое отклонение не превышает 6.5%).

Химическое растворение с газообразованием происходит в результате химической реакции. Установление лимитирующей области протекания процесса - диффузионной или кинетической - по общепринятым критериям (температурный коэффициент, перемешивание) для данных взаимодействий не всегда возможно. Применение вакуума дает возможность надежно идентифицировать лимитирующую стадию процесса. Если в условиях вакуума коэффициент массоотдачи увеличивается, тогда процесс контролируется диффузией. Когда кинетический коэффициент остается постоянным (или уменьшается в результате экранирования твердой частицы газовыми пузырьками), процесс будет протекать в кинетической области.

Каждое химическое взаимодействие сопровождается тепловым эффектом, причем источник тепла находится в межфазной поверхности. В зоне взаимодействия будет самая высокая температура и физические константы, используемые при математическом описании процесса, следует находить при этой температуре. С целью нахождения температуры поверхности твердого тела нами решена система дифференциальных уравнений (8) состоящая из уравнения теплопроводности твердого шарообразного тела, начальных и граничных условий, теплового баланса и условия симметричности системы. В безразмерных координатах система имеет вид;

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial Fo} &= \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{\varphi} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \\ Bi(T_{II} - T_I) + \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right)_{\varphi=1} &= T^* \\ 3Fo(T^* - T^{**}) &= m_0(T_I - T_0) + (\bar{T} - T_0) \\ T(\varphi, 0) &= T_0; T_I(Fo = 0) = T_0 \\ \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right)_{\varphi=1} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (8)$$

В приведенной системе (8) использованы значения :

$$T^* = \frac{\beta C_p Q_k R}{\lambda}; \quad T^{**} = \frac{M_z h R}{4 \pi R^2 \lambda}; \quad m_0 = \frac{M_{10} C_L}{M_T C_T}$$

Особенностью системы (8) является то, что в уравнении теплового баланса учитываются затраты тепла на испарение жидкости при кипении. Они учитываются параметром T^{**} , представляющим отношение количества тепла, расходуемого на испарение жидкости к единице площади твердого тела.

Решение системы проводилось операционным методом, основанным на преобразовании Лапласа.

Общее решение задачи имеет вид:

$$\frac{T - T_0}{T^*} = \frac{m_0 + (1 - \nu) Bi \left(3F_0 + \frac{\Phi^2}{2} \right)}{Bi(1 + m_0)} - \frac{3(1 - \nu) \left[\frac{m_0}{6} (2 + Bi) + \frac{Bi}{10} \right]}{Bi(1 + m_0)^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n} \frac{\sin \mu_n \Phi}{\mu_n \Phi} e^{-\mu_n^2 z} \quad (9)$$

в котором

μ_n - корни характеристического уравнения

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{\mu(3Bi - m_0 \mu^2)}{3Bi + m_0 \mu^2(Bi - 1)};$$

A_n - коэффициенты, определяемые по зависимости

$$A_n = \frac{2 \left[3(1 - \nu) Bi - m_0 \mu_n^2 \right] \left(3Bi - m_0 \mu_n^2 \right)}{3Bi^2(6 - m_0) - \left[m_0 Bi(1 - Bi) + 6Bi^2 + (3Bi - m_0 \mu_n^2) \right] \left(3Bi - m_0 \mu_n^2 \right)}$$

Особый интерес представляет нахождение температуры на поверхности твердого тела T_{Π} . Это значение находится по формуле (9) при значении $\Phi=1$.

В четвертом разделе приведены результаты исследования физического и химического растворения карбоната кальция в неподвижном слое зернистого материала. Растворитель со стационарным слоем зернистого материала является одним из основных типов аппаратов в химической технологии. Их преимущество заключается в том, что они относятся к аппаратам идеального вытеснения, что позволяет получать высокие выходные концентрации раствора. В то же время скорость фильтрации имеет невысокие значения, что приводит к низким значениям коэффициента массоотдачи. Проведение процесса в вакууме при кипении жидкости способствует интенсификации растворения.

Изучение физического растворения проводилось на системе гипс - вода. Стационарный слой формировался из частиц примерно одинакового размера. Использование гипса, имеющего невысокую растворимость, позволило считать поверхность растворения постоянной.

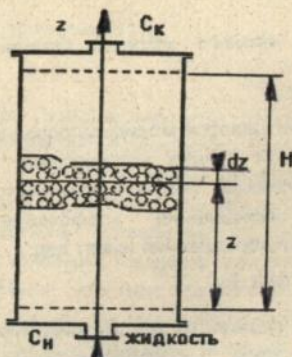


Рис. 4. Схема стационарного слоя.

Определение коэффициента массоотдачи β находилось на основании совместного решения уравнений кинетики и материального баланса согласно схемы, приведенной на рис.

4.

$$\begin{cases} -dM = n\beta S dz C_n d\tau \\ dM = nWS \frac{dC_n}{dz} dz d\tau \end{cases} \quad (10)$$

Выразив поверхность растворения через удельную поверхность твердых частиц и порозность слоя ϵ , окончательный результат для нахождения β будет иметь вид:

$$\beta = \frac{Wd}{\delta(1-\epsilon)H} \ln \frac{C_n}{C_k} \quad (11)$$

В табл. 1 приведены опытные значения коэффициента массоотдачи при физическом растворении гипса для различных величин разрежений Δp .

Таблица 1.

Физическое растворение стационарного слоя гипса в вакууме

№ п/п	Величина разрежения $\Delta p \cdot 10^{-5}$, Па	Фиктивная скорость жидкости $W \cdot 10^{-3}$, м/с	Коэффициент массоотдачи, $\beta \cdot 10^5$, м/с	Степень интенсификации β/β_0
1	0.00	4.91	1.904	1
2	0.77	5.61	3.071	1.613
3	0.83	6.78	6.025	3.164

Как видно из приведенной таблицы, достигается значительная интенсификация при растворении стационарного слоя в условиях вакуума.

Аналогичные опыты были проведены и при химическом растворении слоя на примере взаимодействия карбоната кальция с соляной кислотой низких концентраций, отвечающих пузырьковому режиму газообразования.

Замерялась выходная концентрация кислоты при различных разрежениях в системе. В табл. 2 приведены полученные экспериментально значения коэффициента массоотдачи β , которые наглядно свидетельствуют о высокой степени интенсификации массообмена в вакууме, причем чем глубже вакуум, тем сильнее интенсификация. Роль газообразной фазы сводится к воздействию на пограничный диффузионный слой в окрестностях отдельной частицы, а также, поднимаясь по колонне, газ турбулизирует жидкость по высоте аппарата. Кроме того, на массообмен оказывает влияние и движение

жидкостного потока. Количественная оценка второго эффекта (движение жидкости) дается зависимостью

$$Sh_2 = 0.395 \cdot Re_2^{0.64} \cdot Sc^{0.33}$$

Влияние газообразной фазы на массообмен учитывается модифицированным числом Рейнольдса Re^* . На основании опытных данных установлено, что влияние газообразной фазы учитывается сложной полупологарифмической зависимостью. Общее уравнение для определения коэффициента массоотдачи в области пузырькового режима газообразования имеет вид:

$$\frac{Sh_2}{\sqrt{Sc}} = 10.2 + 0.395 Re_2^{0.64} + 5.05 \ln Re_2 \quad (12)$$

Приведенная формула свидетельствует о сложности рассматриваемого процесса химического растворения в слое, сопровождающегося газообразованием.

Таблица 2.

Значения коэффициента массоотдачи β при химическом растворении карбоната кальция в слое зернистого материала.

№ п/п	Величина разрежения, $\Delta p \cdot 10^{-5}$, Па	Фиктивная скорость раствора, $W^* \cdot 10^{-3}$, м/с	Коэффициент массоотдачи $\beta \cdot 10^5$, м/с	Степень интенсификации β/β_0
1	0.00	9.28	5.8770	1.00
2	0.19	9.16	8.5140	1.45
3	0.40	9.85	10.8237	1.84
4	0.60	9.46	13.2338	2.25
5	0.82	12.10	19.4154	3.30

Составлена математическая модель процесса химического растворения твердых веществ в слое. В основе модели лежат уравнения материального баланса

$$M_0 - M = n\dot{V}(C_R - C_K) \quad (13)$$

и кинетическое

$$\frac{dM}{d\tau} = n\beta FC_R \quad (14)$$

Решение данной системы для пузырькового режима газообразования, при котором можно выразить коэффициент массоотдачи β через концентрацию реагента C_R (уравнение (7))

$$\beta = AC_R$$

имеет вид

$$\frac{1}{3a^2} \left\{ \frac{1}{(a^2 - 1)} - \frac{\varphi}{(a^2 - \varphi^2)} + 2[\Phi(1) - \Phi(\varphi)] \right\} = \frac{2a^2 A}{\rho_r d_r n} \quad (15)$$

В уравнении (15)

$$\Phi(x) = \frac{1}{b a^2} \ln \frac{a^2 + ax + x^2}{(a-x)^2} + \frac{1}{d^2 \sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2x+a}{a\sqrt{3}}$$

При подстановке $\Phi=0$ получаем время полного растворения T , которое используется для расчета основных размеров растворителя.

В пятой главе исследовано физическое и химическое растворение крупных плоских объектов в условиях вакуума. Такие процессы находят широкое применение в геотехнологических методах добычи полезных ископаемых, создании подземных хранилищ, подготовки месторождений для добычи полезных ископаемых и др. В настоящее время геотехнологические процессы растворения осуществляются в условиях естественной конвекции, характеризующиеся низкими величинами коэффициента массоотдачи, в результате чего время растворения получается весьма длительным. Применить средства интенсификации в таких процессах весьма сложно, в то же время создание вакуума в системе позволяет значительно интенсифицировать растворение и характеризуется простотой его осуществления.

Изучение процесса физического растворения осуществлялось на плоских образцах из хлорида натрия. Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена в диссертации, при вертикальном и горизонтальном расположении плоских объектов. Результаты опытов приведены в табл. 3.

Как явствует из табл. 3, создание вакуума, сопровождающееся кипением жидкости, приводит к значительной интенсификации растворения, что в несколько раз позволит сократить, например, строительство подземных хранилищ.

Таблица 3.

Значение коэффициента массоотдачи при растворении плоских объектов из хлорида натрия.

№ п/п	Разрежение в системе $\Delta P \cdot 10^5$, Па	Первоначальная температура, °С	Коэффициент массоотдачи β , м/с	Степень интенсификации V/V_0
Горизонтальное расположение				
1	0	70	$4.31 \cdot 10^{-5}$	1.00
2	0.64	71	$6.82 \cdot 10^{-5}$	1.58
3	0.81	72	$1.28 \cdot 10^{-4}$	2.97
Вертикальное расположение				
1	0	70	$5.00 \cdot 10^{-5}$	1.00
2	0.64	70	$8.52 \cdot 10^{-5}$	1.70
3	0.81	70	$1.65 \cdot 10^{-4}$	3.30

Сравнение вертикального и горизонтального положения показывает, что для вертикальных образцов величины β выше, чем для горизонтально расположенных. Это связано с тем, что на горизонтальных пластинах растворимый продукт, образующийся непосредственно на поверхности, там и остается, повышая вязкость пограничного диффузионного слоя, в то время как с вертикальных поверхностей он стекает вниз под действием разности плотностей.

Химическое растворение плоских крупных объектов проводилось на системе карбонат кальция - соляная кислота концентраций 8.4, 12.53, 19.25 кг/м³ (пузырьковый режим газообразования). Опыты проводились в широком диапазоне разрежений. В области низких разрежений интенсификация происходит только за счет выделяющейся при реакции двуокиси углерода, в области глубокого вакуума дополнительно выделяется и парообразная фаза за счет кипения жидкости. Были проведены опыты для горизонтальной

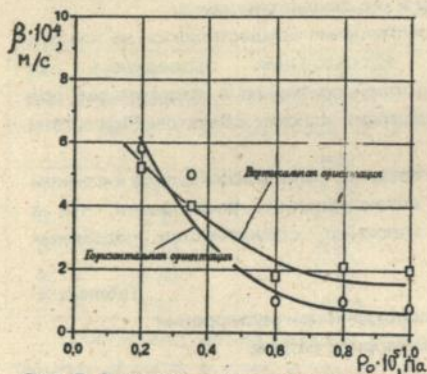


Рис. 5. Зависимость коэффициента массоотдачи β от остаточного давления.

и вертикальной ориентации образцов. На рис. 5 приведены значения коэффициентов массоотдачи β от величины остаточного давления Δp . Установлено, что в области низких концентраций соляной кислоты ориентация поверхности не влияет на коэффициент массоотдачи, поскольку концентрация хлорида кальция (растворимого продукта реакции) будет низкой и не влияет на массообмен.

Опытные результаты удовлетворительно описываются уравнением (7). Наблюдается некоторое уменьшение значений чисел Шервуда, что очевидно, связано с различной формой частиц - шарообразные и плоские крупные объекты.

В этом же разделе приводится энергетическая оценка метода интенсификации в условиях вакуума. Рассматриваются два случая физического растворения слоя твердых частиц. В первом случае растворение происходит в области невысоких скоростей раствора, а интенсификация достигается за счет вакуумирования системы. В данном случае затраты энергии складываются из затрат на преодоление сопротивления слоя и на вакуумирование. Укажем, что

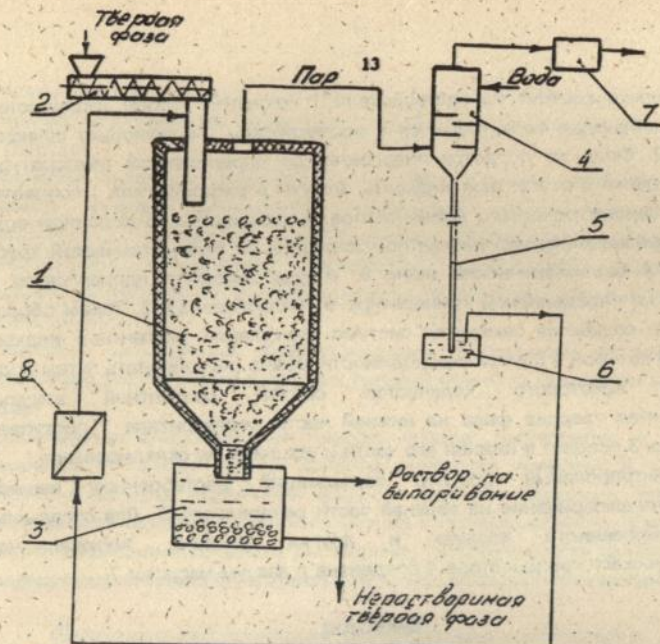


Рис. 6. Технологическая схема узла растворения твердого вещества, содержащего пустую породу.

вакуум в системе создается за счет конденсации водяного пара, а вакуум-насос служит только для откачивания несконденсированных газов. Расчеты показали, что общие затраты энергии в первом случае составляют 24,1 Вт. Достигнуть данной степени интенсификации можно и увеличив скорость движения раствора, что вызовет повышение сопротивления слоя. Затраты энергии на преодоление сопротивления во втором случае составляют 300 Вт.

Приведенные расчеты свидетельствуют о значительной экономии энергии при интенсификации растворения методом вакуумирования. В работе предложена технологическая схема процесса непрерывного растворения слоя зернистого материала в условиях вакуума (рис. 6). В большинстве случаев растворимое вещество (например, калийные соли) находится в смеси с нерастворимой твердой фазой, которая после растворения отделяется от раствора. За основу был выбран аппарат с движущимся зернистым слоем. Нами выбрана прямоточная схема растворения, позволяющая легко осуществлять проблему транспортирования твердой фазы. Преимуществом слоевого аппарата является отсутствие движущихся частей, простота исполнения аппарата и в то же время за счет кипения раствора при вакуумировании высокая интенсивность его проведения.

Установка состоит из растворителя 1, покрытого слоем изоляционного материала. Твердая фаза подается в растворитель 1 с помощью шнекового питателя 2. Сюда же подается подогретая до определенной температуры в теплообменнике 8 реагентная жидкость. Вакуум в растворителе 1 создается с помощью барометрического конденсатора 4, охлаждаемого холодной водой. Сконденсировавшийся пар реагентной жидкости по барометрической трубе 5 поступает в барометрический ящик 6, откуда жидкость направляется для подогрева до определенной температуры в теплообменник 8. Таким образом, в установке создается замкнутая система циркуляции реагентной жидкости, количество которой в случае необходимости можно регулировать путем подачи (подпитки) некоторого количества свежей реагентной жидкости. Нерастворимая твердая фаза из нижней части растворителя 1 поступает в разделитель 3, оседает в нижней его части и удаляется на складирование.

Концентрированный раствор содержащий растворенное вещество поступает на выпаривание из верхней части разделителя 3. Для отсасывания несконденсированного воздуха и других веществ, верхняя часть барометрического конденсатора 4 соединена с вакуум-насосом 7.

Выводы

1. Разработан процесс физического и химического растворения твердых тел с использованием для интенсификации вакуума.
2. Показано, что при физическом растворении интенсификация происходит только при разрежениях, соответствующих кипению жидкости, а при химическом растворении с газовыделением интенсификация массобмена наблюдается во всем диапазоне величин разрежения.
3. Дана оценка пульсационной компоненты скорости жидкости на основании теории локальной изотропной турбулентности по величине энергии диссипации пара в случае физического, растворения единичных частиц. Результаты экспериментов обобщены критериальной зависимостью.
4. В случае химического растворения с газовыделением гидродинамическая обстановка охарактеризована модифицированным числом Рейнольдса, в котором скорость жидкости выражена через скорость газообразования. Полученные результаты обобщены для всего диапазона величин разрежений критериальной зависимостью.
5. Показано, что для гетерогенного химического взаимодействия в системе твердое тело - жидкость, сопровождающегося газообразованием, применение вакуума является наиболее корректным и надежным методом установления лимитирующей стадии процесса.

6. Решена краевая задача с поверхностным источником тепла в случае химического растворения, позволяющая найти распределение температур в зоне реакции.

7. Изучение процесса растворения в стационарном слое дисперсного материала показало возможность применения вакуума для ускорения физического и химического растворения. Установлены кинетические закономерности, позволяющие определить коэффициент массоотдачи. Приведена математическая модель процесса растворения твердых веществ в условиях вакуума.

8. Показана возможность интенсификации растворения вертикально и горизонтально расположенных плоских крупных объектов созданием вакуума в системе.

9. Произведена энергетическая оценка метода растворения в слое и установлено, что энергетические затраты снижаются примерно в 10 раз по сравнению с методом увеличения скорости движения жидкости. Указано на перспективность применения данного метода в промышленности. Предложена технологическая схема процесса растворения, рекомендуемая для внедрения на предприятиях химической, фармацевтической, пищевой промышленности.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Gumnitsky Ja., Yurym N., Osman Atja The mass transfer during dissolving solids in condition of gas supply and in vacuum. -Konferencja Naukowa. Inzeneria chemiczna, tom 1, Krakow, 1994, s. 319-326.

2. Гумницкий Я.М., Осман А., Юрим М.Ф. Ідентифікація дифузійно-контрольованих процесів хемічного кипіння. // Тези наук. конференц. "Стан і перспективи розвитку хімічної науки та промисловості в Західному регіоні України". -Львів, 1994, с.106.

Условные обозначения.

A, b -коэффициенты; c -концентрация, кг/м³; D -коэффициенты диффузии, м²/с; F -поверхность, м²; g -ускорение земного тяготения, м/с²; H -высота, м; d -диаметр частицы, м; L -линейный размер, м; M -масса, кг; T -температура, °C; R -радиус, м; M_L -расход паровой фазы, кг/с; C_T, C_L -теплоемкость, Дж/(кг*К); Q_R -тепловой эффект реакции, Дж/кг; β -коэффициент массоотдачи; м/с; τ -время, с; ρ -плотность, кг/м³; ν -кинематическая вязкость, м/с²; λ -коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К). Индексы: S -насыщение; т -твердое тело; о -начальные условия; с -секундный; п -пар; -поверхность твердого тела; R -реагент; г -газ; L -раствор; к -конечный; з -эквивалентный.

Обобщенные переменные: $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ - число Био; $\varphi = \frac{r}{R}$ - безразмерный радиус;
 $Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2}$ - число Фурье.

Анотація

Осман Атия Ель-Хабіб. Массообмін при фізичному та хімічному розчиненні твердих тіл в умовах вакууму. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.17.08 - процеси, машини і апарати хімічних та нафтохімічних виробництв. Державний університет "Львівська політехніка", Львів, 1995.

Захищаються 12 роботи, в яких досліджено метод інтенсифікації процесів фізичного та хімічного розчинення в умовах вакууму, що викликає кипіння рідини та перемішування середовища парою, що виділяється. Встановлено кінетичні закономірності процесу розчинення одиночних твердих частинок, стаціонарного шару та плоских великих об'єктів. Приведена кількісна оцінка отриманих експериментальних результатів. Розроблено математичні моделі процесів розчинення. Виконано енергетичну оцінку методу розчинення у вакуумі в порівнянні до збільшення швидкості потоку. Запропоновано технологічну схему розчинення в умовах вакууму.

Summary

Osman Atia Elhabib. Mass transfer in physical and chemical dissolution of solids under vacuum condition. Dissertation for a doctorate degree on speciality 05.17.08 - Processes, machines and equipments of chemical and petrochemical production. State University 'Lviv Polytechnic', Lviv, 1995.

Defending the method of intensification of physical and chemical process of dissolution under vacuum condition, which causes boiling liquids and mixing of medium by vapour. The kinetic mechanism of dissolution processes of a unit solid particles, stationary layer, and flat big object, were obtained. The quantitative analysis of experimental results were carried out. The mathematical model of dissolution process was developed. The energy analysis of dissolution method in vacuum, in relation to increment of flow rate, were carried out. Proposed flow chart of dissolution under vacuum.

Ключевые слова: массообмен, физическое растворение, химическое растворение, интенсификация, коэффициент массоотдачи, система твердое тело - жидкость.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Підп. до друку 23.05.95. Формат 60x84¹/16
Папір друк. № 2. Офс. друк. Умовн. друк. арк. 1
Умовн. фарб.-відб. 1 Умовн. видав. арк. 0.93
Тираж 100 прим. Зам. 121. Безплатно

ДУЛП 290646 Львів-13, Ст. Бандери, 12

Дільниця оперативного друку ДУЛП
Львів, вул. Городоцька, 286

448648

AB 32.428

AB 32.428