НОМОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ КРИСТАЛЛОВ В КЛАССИФИЦИРУЮЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ.

Юлдашев Лазиз Ташпулатович

Алмалыкский филиал Ташкентского Технического Университета им. Ислама Каримова, Республики Узбекистан, г. Алмалык.

Кафедра «Физики и Химии» Старшый преподователь.

Аннотация. В статье предложен номографический метод расчета параметров псевдоожиженного слоя при классификации кристаллизаторов, используемых в химической промышленности. Данный метод упрощает расчеты основных параметров, важных при проектировании кристаллизаторов, таких как скорость потока раствора, пористость слоя и диаметр частиц. Авторами построена номограмма, позволяющая проводить графические расчеты для кристаллических систем с различными физико-химическими свойствами. В статье приведено пошаговое руководство по использованию номограммы, а также практические примеры расчетов (для кристаллов сульфата аммония). Показано, что предложенная методика может быть применена и к другим процессам — экстракции, адсорбции и т. д. Ключевые слова: кристаллизатор, псевдоожиженный слой, номограмма, число Архимеда, число Рейнольдса, пористость, классификация.

Ключевые слова: кристаллизатор, псевдоожиженный слой, номограмма, число Архимеда, число Рейнольдса, пористость, классификация.

Annotatsiya. Mazkur maqolada kimyo sanoatida qo‘llaniladigan klassifikatsiyalovchi kristallizatorlarda soxta suyuqlangan qatlam parametrlarini hisoblash uchun nomografik metod taklif etilgan. Bu usul kristallizatorlarni loyihalashda muhim bo‘lgan eritma oqimi tezligi, qatlam porozligi, zarralar diametri kabi asosiy parametrlarga oid hisob-kitoblarni soddalashtiradi. Mualliflar tomonidan nomogramma tuzilib, u orqali turli fizikaviy-kimyoviy xossalarga ega kristall-tizimlar uchun grafik hisoblash imkoniyati yaratilgan. Maqolada nomogrammadan foydalanish bo‘yicha bosqichma-bosqich qo‘llanma, shuningdek, amaliy hisoblash misollari (ammoniy sulfat kristallari uchun) keltirilgan. Taklif etilgan metodika boshqa jarayonlar — ekstraksiya, adsorbsiya kabi dispers tizimlar uchun ham qo‘llanilishi mumkinligi ko‘rsatilgan.

Kalit so‘zlar: kristallizator, soxta suyuqlangan qatlam, nomogramma, Arximed soni, Reynolds soni, porozlik, klassifikatsiya.

Abstract. The article proposes a nomographic method for calculating fluidized bed parameters when classifying crystallizers used in the chemical industry. This method simplifies the calculations of the primary parameters crucial in designing

ISSN 3030-3907

crystallizers, including solution flow rate, bed porosity, and particle diameter. The authors constructed a nomogram that enables graphical calculations for crystalline systems with varying physicochemical properties. The article provides a step-by-step guide to using the nomogram, along with practical examples of calculations (for ammonium sulfate crystals). It is demonstrated that the proposed technique can be applied to other processes, such as extraction and adsorption.

Keywords: crystallizer, fluidized bed, nomogram, Archimedes number, Reynolds number, porosity, classification.

Введение

В химической промышленности находят применение классифицирующие кристаллизаторы, позволяющие получать крупнокристаллический продукт однородного гранулометрического состава [1]. При проектировании таких кристаллизаторов необходима оценка параметров псевдоожиженного слоя кристаллов: рабочей скорости раствора в аппарате, диапазона размеров выталкиваемых частиц, порозности слоя, диаметра сепарируемых из слоя частиц и др. В данной статье излагается метод расчета параметров при помощи разработанной номограммы.

Рассмотрим цилиндрический кристаллоотделитель с нижним вводом раствора (рис. 1). Здесь полидисперсная кристаллическая суспензия переходит в псевдоожиженное состояние и происходит гидравлическая классификация зерен по размерам.[2] При определенной средней скорости потока u в каждом поперечнике кристаллов со средним размером частиц d_1 можно установить порозности слоя ε_1, ε_2, ..., ε_i, причем из слоя будут выноситься в циркуляционный раствор частицы с диаметром d_i.

Для расчета рабочей скорости раствора в цилиндрическом аппарате и порозности псевдоожиженного слоя при переходном режиме стесненного обтекания частиц получены следующие уравнения [3]:

при $36 < Ar < 2500$:

$$Re = 0{,}105 \cdot Ar^{0.78} \cdot \varepsilon^{5.2} / Ar^{0.06} \quad (1)$$

$$\varepsilon = (1{,}542 \cdot Re^{0.1923} / Ar^{0.15}) \cdot Ar_0^{0.06} \quad (2)$$

при $2500 < Ar < 10^5$:

$$Re = 0{,}335 \cdot Ar^{0.63} \cdot \varepsilon^{5.2} \cdot Ar_0^{0.06} \quad (3)$$

$$\varepsilon = (1{,}234 \cdot Re^{0.1923} / Ar^{0.12}) \cdot Ar^{0.06} \quad (4)$$

где:

$R_e = u d_k \rho / \mu$ — число Рейнольдса;

$Ar = d_k^3 g(\rho_k - \rho) / \mu^2$ — число Архимеда;

u — скорость раствора, отнесенная к свободному сечению аппарата, м/с;

d_k — эквивалентный диаметр частицы, м;

ISSN 3030-3907

ρ и ρ_k — плотность соответственно раствора и кристаллов, кг/м³;
g — ускорение свободного падения, м/с²;
μ — динамическая вязкость раствора, Па·с.

Результаты вычислений по уравнениям (1) и (3) сравнивали с данными расчетов по известным уравнениям О. М. Тодеса с сотр., Беранека и др. Получено вполне удовлетворительное соответствие, при этом максимальный разброс по скорости потока не превышал ±12 % [3], а по порозности слоя — ±2,7 %.

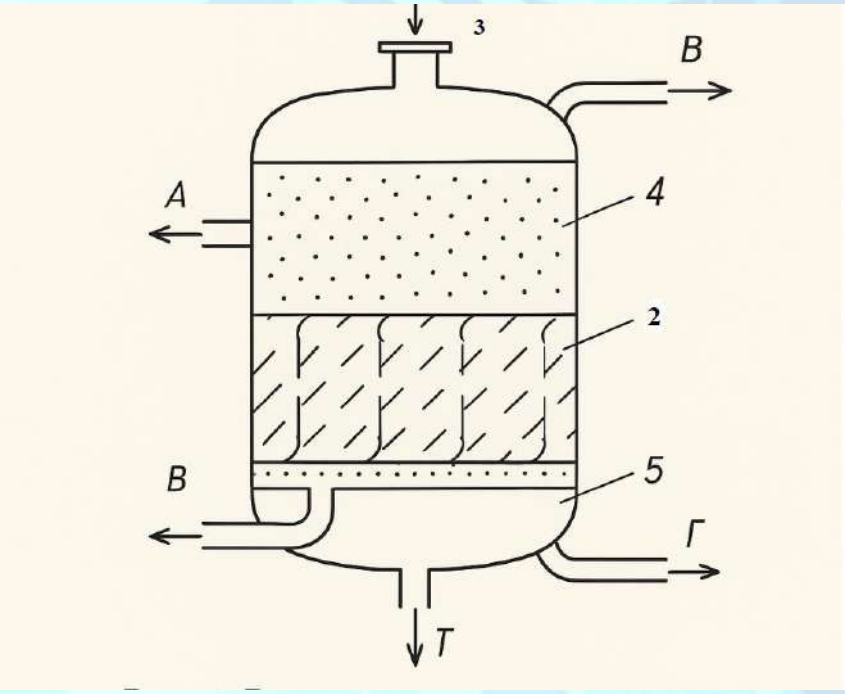


Рисунок 1. Расчетная схема аппарата псевдоожиженным слоем кристаллов: 1) корпус; 2) днище; 3) крышка; 4 и 5) патрубки соответственно для ввода и вывода раствора; 6) Патрубок для отвода кристаллической суспензии; 7) Патрубок для перелива

Решая уравнение (1) относительно рабочей скорости потока раствора, получим:

$$u = Re \cdot \mu / (d_k \cdot \rho) = 0{,}105 \cdot \mu \cdot Ar^{0{,}78} \cdot \varepsilon^{5{,}2} / Ar^{0{,}06/(d_k \cdot \rho)} \qquad (5)$$

Соответственно из уравнения (3) найдём:

$$u = 0{,}335 \cdot \mu \cdot Ar^{0{,}63} \cdot \varepsilon^{5{,}2} / Ar_0^{0{,}06} \cdot (d_k \cdot \rho) \qquad (6)$$

Из уравнения (5) следует:

$$\lg u = (\lg Re - \lg d_k^p) + (\lg \mu - \lg \rho) \qquad (7)$$

Уравнение (7) можно графически представить в виде суммы для отрезков, пропорциональных логарифмам числе Re, d_k, μ и ρ.

Уравнения (5) и (6) можно использовать для установления связи между порозностью псевдоожиженного слоя и диаметром витающих частиц. Запишем уравнение (5) для двух монофракций витающих кристаллов с

ISSN 3030-3907

размерами d_1 и d_i, охватываемыми диапазоном чисел Архимеда $36 < (Ar_i - Ar_1) < 2500$, имея в виду, что для цилиндрического аппарата скорость раствора по высоте остается неизменной и для постоянных свойств ожижающей среды и частиц справедлива зависимость $Ar_i = Ar_1 \cdot (d_i / d_1)^3$. При этом получим:

$$\varepsilon_i^{5.2} / Ar_i^{0.06} = \varepsilon_1^{5.2} / Ar_1^{0.06} = \varepsilon_i^{5.2} / (Ar_1 \cdot (d_i / d_1)^3)^{0.06} = \varepsilon_i^{5.2} / Ar_1^{0.06} \cdot (d_i / d_1)^{0.18}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_i^{5.2} = \varepsilon_1^{5.2} \cdot Ar_1^{0.06} / Ar_i^{0.06} = \varepsilon_1^{5.2} \cdot (d_1 / d_i)^{0.18} \qquad (8)$$

Решая уравнение (8) относительно ε_i, найдем:

$$\varepsilon_i = [\varepsilon_1^{5.2} \cdot (d_1 / d_i)^{0.258} \cdot Ar_1^{0.06}]^{1/5.2} = \varepsilon_1 \cdot (d_1 / d_i)^{0.05} \cdot (0{,}258 \cdot Ar_1^{0.06})^{0.18} \qquad (9)$$

При $\varepsilon_i = 1{,}0$ из уравнения (9) определим диаметр уносимых из слоя частиц:

$$d_i / d_1 = \varepsilon_1^{3.88} / Ar_1^{0.06} \qquad (10)$$

Используя уравнение (6) для диаметров частиц d_1, d_i и $d\alpha$, охватываемых диапазоном $2500 < (Ar_i - Ar_1) < 10^5$, аналогично найдем:

Наконец, если монофракции зерен диаметром охватываются диапазоном $36<(Ar_y - Ar_i)<2500$, а монофракция крупных зерен диаметром d_1 находится в интервале чисел $(Ar_1)<2500$, то, решая совместно уравнения (5) и (6), получим:

Для уменьшения объема расчетов по приведенным уравнениям построена номограмма, представленная на рис. 2. Номограмма позволяет определять рабочую скорость раствора в аппарате, а также диаметр уносимых из аппарата частиц в зависимости от свойств раствора (ρ и μ) и параметров псевдоожиженного слоя крупной монофракции зерен (d_1, ε_1, Ar_1, Re_1). На левом верхнем поле номограммы графически представлена связь параметров псевдоожиженного слоя в диапазоне размеров витающих частиц от d_1–d_y, на левом нижнем поле — связь диаметра уносимых частиц с параметрами крупной монофракции зерен, на нижнем правом поле номограммы учтены параметры раствора.

При практическом использовании номограммы необходимо сделать следующее.

1. Определить параметры физико-химических свойств взаимодействующих фаз в рабочих условиях (ρ_k, ρ, μ) и вычислить число Архимеда (Ar_1), базируясь на диаметр крупной монофракции зерен d_1, причем:

2. Задать значение ε_1 крупной монофракции зерен и по числу Архимеда Ar_1 на левом верхнем поле номограммы найти положение рабочей точки, провести через неё вправо прямую, параллельно оси абсцисс, до пересечения со шкалой чисел Рейнольдса, отметить значение Re_1.

ISSN 3030-3907

3. По шкале X отметить диаметр частицы d_1, через полученную точку параллельно шкале чисел Рейнольдса провести прямую до пересечения с линией, соединяющей рабочую точку с числом Re_1. Через полученную точку пересечения линий под углом 45 °C провести прямую в правое нижнее поле до пересечения с линией ЛМ.

4. По числу Ar_1 и значению ε_1 на левом нижнем поле номограммы определить положение рабочей точки и найти отношение диаметров частиц $d_\gamma / d_1 = k$, затем вычислить диаметр уносимых из аппарата частиц:

5. По шкале Z отложить значение плотности раствора и через полученную точку провести прямую, параллельную оси ординат, до пересечения с линией, перпендикулярной шкале U и проходящей через точку, характеризующую вязкость раствора. Через полученную точку под углом 45°C провести прямую до пересечения со вспомогательной шкалой Y, а из точки пересечения параллельно оси абсцисс провести прямую до пересечения ее в точке М с прямой ЗМ.

6. Из точки М пересечения прямых провести линию, перпендикулярную шкале V, искомое значение рабочей скорости раствора в свободном сечении аппарата прочитать по шкале V.

Использование номограммы проиллюстрируем примерами.

Пример 1. Определить рабочую скорость раствора и диаметр уносимых частиц для системы кристаллы сульфата аммония — насыщенный водный раствор при 25 °C. Эквивалентный диаметр частиц крупной монофракции кристаллов $d_1 = 1{,}8$ мм,

плотность кристаллов $\rho_k = 1770$ кг/м³,

плотность раствора $\rho = 1248$ кг/м³,

вязкость раствора $\mu = 2{,}18 \cdot 10^{-3}$ Па·с,

порозность слоя $\varepsilon_1 = 0{,}70$.

Решение:

1. Число $Ar_1 = 1.8^3 * 10^{-9} * 9.81x1248(1770-1248)/(2.18^2 * 10^{-6} = 7842)$; нанесем на номограмму т. А (см. рис. 2). 2. По числу Ar_1 и значению $\varepsilon_1 = 0{,}70$ наносим рабочую точку Б, проводим линию БЕ, определяем $Re_1 = 32{,}2$. 3. На шкале X для $d_1 = 1{,}8$ мм отмечаем т. Д и проводим через нее прямую, параллельную оси ординат, находим положение т. З. 4. На левом нижнем поле номограммы по значению числа Ar_1 (т. А) и $\varepsilon_1 = 0{,}70$ находим положение т. В и определяем отношение $d_\gamma / d_1 = 0{,}39$ (т. Г). Рассчитываем: $d_y = 0.39 * 1.8 = 0.7$мм. 5. По плотности раствора $\rho = 1248$ кг/м³ (т. Ж) и его вязкости $\mu = 2{,}18 \cdot 10^{-3}$ Па·с (т. И) находим положение точек К и Л. На

ISSN 3030-3907

пересечении линий ЛМ и ЗМ фиксируем т. М и по шкале V находим значение *u*. Ответ: u=3.1*10^{-2}м/с, d_y=0.70мм.

Пример 2. По условиям примера 1 определить порозность псевдоожиженного слоя продукционных кристаллов и диаметр уносимых из слоя частиц, если рабочую скорость увеличить до 5,0·10^{-2} м/с.

Решение:

1. По значению u = 5,0·10^{-2} м/с (т. П), вязкости (т. И) и плотности раствора (т. Ж) определяем т. Р, через которую под углом 45° проводим прямую до пересечения с линией ДЗ, отмечаем т. С. 2. Через т. С проводим прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с продолжением прямой АБ. Точка Т — пересечение линий АТ и СТ — определяет рабочую точку системы в изменившихся условиях и дает значение Re_1. 3. Через т. А проводим линию АЦ до значения ε_1 = 0,82 (положение т. Ц), определяет отношение d_γ / d_1 = 0,45. Вычисляем диаметр уносимых из аппарата частиц d_y=0.45*1.8=0.81 мм. Ответ: ε_1 = 0,82, d_{y1}=0.81мм.

Пример 3. По условиям примера 1 определить порозность псевдоожиженного слоя для монофракции зерен диаметром d_3 = 1,0 мм.

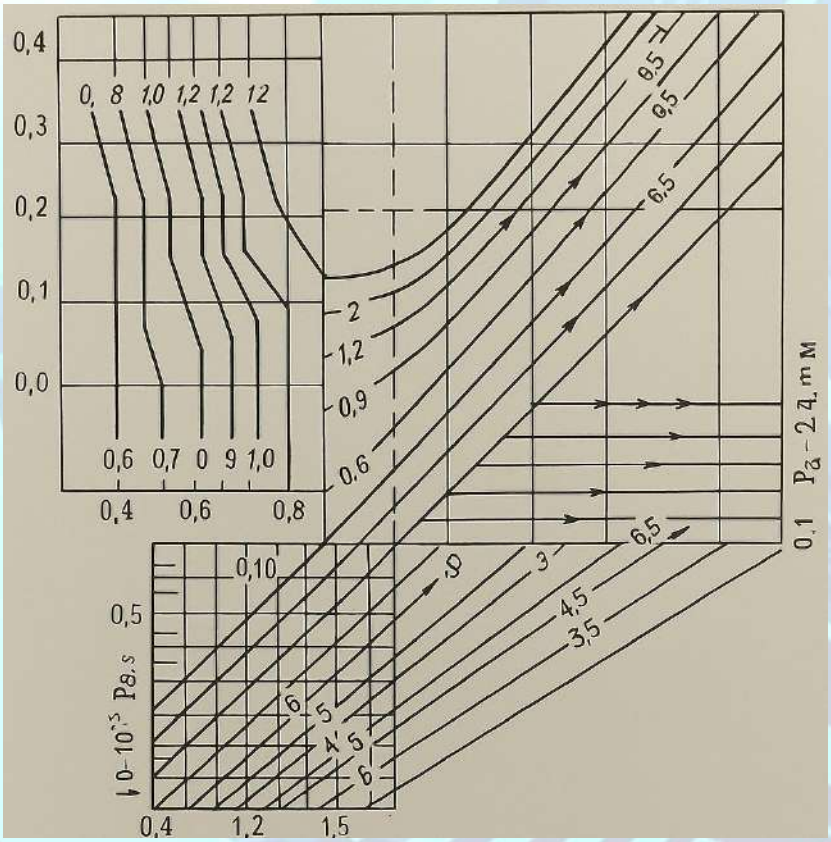


Рисунок 2. Номограмма для расчета параметров псевдоожиженного слоя кристаллов в цилиндрическом кристаллорастителе.

Решение: 1. Рассчитываем $Ar_{3=}$ $Ar_1(1,0/1.8)^3$=1345, наносим на шкалу абсцисс, т. Я. 2. На линии ЗМ по значению d_3 = 1,0 мм определяем положение

ISSN 3030-3907

т. Э. 3. На взаимно перпендикулярном пересечении линий, протрассированных из Я и Э, находим т. О, соответствующую искомой порозности слоя. Ответ: $\varepsilon_з = 0,86$.

Номограмма может быть использована для расчетов псевдоожиженных жидкостями практических гетерогенных дисперсных систем с различиями свойств, например, для определения параметров псевдоожиженного слоя твердых частиц в процессах экстракции и жидкостной адсорбции [4]. Подобные расчеты на номограмме можно проводить и в случае подачи раствора по центральной опускной трубе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Кузьминых К. Г. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ГАЛУРГИЧЕСКОГО ХЛОРИДА КАЛИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ТОВАРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.
2. Яценко А. А. и др. СПОСОБ ОБОГАЩЕНИЯ СУЛЬФИДНЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД, СОДЕРЖАЩИХ СОБСТВЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОВЫХ МЕТАЛЛОВ И МАГНЕТИТ. – 2000.
3. Пикалов Е. С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Механические и физические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: учебное пособие. – 2015.
4. Войтов И. В. и др. Процессы и аппараты химической технологии. Гидромеханические процессы: учебное пособие для студ. вузов. – 2019.

ISSN 3030-3907