

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ САУ УРОВНЕМ pH ВОДНЫХ РАСТВОРОВ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ХЛОРА И КАУСТИЧЕСКОЙ СОДЫ

Жукова Н. В., доц., к.т.н., доц.; Хачиков А. А., магистрант

(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР)

Постановка задачи. Управление pH часто изучается в литературе по управлению, поскольку он представляет такой уникальный случай нелинейности, и нелинейность может быть очень проблематичной в управлении процессом. В системах управления pH, чаще всего в качестве управляемой величины выступает pH, однако, в действительности, мы пытаемся измерить и управлять концентрацией ионов или ионным потоком (хоть спецификация может быть в терминах pH). pH - это просто удобная мера концентрации ионов посредством электродного потенциала, как описано уравнением Нернста (1). Уравнение Нернста — уравнение, связывающее окислительно-восстановительный потенциал системы с активностями веществ, входящих в электрохимическое уравнение, и стандартными электродными потенциалами окислительно-восстановительных пар. Однако зависимость Нернста между концентрацией ионов (точнее, активностью) и потенциалом электрода логарифмическая - отсюда нелинейность и ее представление как pH [1].

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{Ox}}{a_{Red}}, \quad (1)$$

где:

E – электродный потенциал, E^0 – стандартный электродный потенциал, измеряется в вольтах;

R – универсальная газовая постоянная, равная 8.31 Дж/(моль·К);

T – абсолютная температура;

F – постоянная Фарадея, равная 96485,35 Кл·моль⁻¹;

n – число электронов, участвующих в процессе;

a_{Ox} и a_{Red} – активности соответственно окисленной и восстановленной форм вещества, участвующего в полуреакции.

Большинство статей об управлении pH [2, 3] принимают измерение pH как контрольную переменную и применяют стратегии для модификации части ПИД-алгоритма, обычно усиление регулятора, чтобы компенсировать нелинейность. Это может включать в себя такие методы, как адаптивное усиление или распределение усиления, с низким уровнем фиксированного усиления, где pH наиболее чувствителен к изменениям в реагенте (высокий коэффициент усиления процесса) и с увеличением коэффициента усиления, когда pH выходит из этой области высокого коэффициента усиления. В результате получаем функцию усиления регулятора с двумя точками останова. Во многих случаях это может быть достаточно эффективным. Успех такого подхода зависит от того, насколько близко контроллер получает значения, чтобы компенсировать изменение коэффициента усиления процесса на кривой титрования. Должны быть выбраны точки останова, а также степень регулировки усиления, и некоторая нестабильность управления может наблюдаться вокруг этих точек останова, даже если эти параметры тщательно выбраны.

Альтернативный подход предполагает линеаризацию pH вне алгоритма управления. В литературе существуют стратегии линеаризации [4, 5], которые используют различные подходы для характеристики pH обратно к концентрации ионов, от кусочных кривых титрования до строгого решения моделей баланса заряда для сложных смесей с буферами и полипрофильными компонентами. Их может быть трудно применять и эффективно поддерживать в организациях предприятий с ограниченными ресурсами управления

процессом. Кроме того, кусочная линеаризация может иметь в меньшем масштабе проблемы с точками останова, аналогичные адаптивным стратегиям усиления.

В каждом из этих подходов сдвиги в кривой титрования из изменяющихся условий могут потребовать значительного изменения параметров используемой стратегии управления в зависимости от его сложности. Вот почему важно сохранить стратегию управления относительно простой, с несколькими параметрами для изменения, но достаточно адаптивной, чтобы оставаться эффективной при изменении условий.

Потоки отходов химических установок, требующие нейтрализации, часто представляют собой комбинации потоков из нескольких процессов, доведенных до одного места для нейтрализации с помощью каустика или гашеной извести. Полученный в результате входной поток нейтрализации представляет собой сложную смесь из нескольких компонентов. Следовательно, кривая титрования может не проявляться как простая сильная кислота, слабая кислота или даже полипротоновая кислота, а как комбинированная кривая, представляющая эффекты нескольких из них. Эта комбинированная кривая чаще всего будет намного более гладкой версией ее компонентных кривых, с отдельными плато и изгибами, исчезающими в общей форме кривой. Целью обычно является не полная нейтрализация (рН около 7), а вместо этого частичная нейтрализация, чтобы свести к минимуму использование реагентов при ограничении с низким рН (5-6). При частичной нейтрализации кислотная сторона кривой титрования представляет основной интерес. Переход на базовую сторону либо не является вероятным, либо приведет к срабатыванию блокировки или другого дискретного действия, отменяя основную стратегию управления.

Строгое решение уравнений баланса заряда для сильных кислот, слабых кислот и более сложных систем находится в пределах возможностей современных систем распределённого управления (PCY). Тем не менее, в этом подходе рассматриваются упрощения, которые легче реализовать и поддерживать, которые не оказывают существенного влияния на точность диапазона значений рН, представляющих интерес.

Определение рН с точки зрения концентрации ионов водорода включает логарифм по основанию 10. Интересно отметить, что форму вычисленной кривой титрования сильной кислоты можно сгладить в различной степени, понижая основание логарифма в этом уравнении. Изменяя основание логарифма, полученную кривую «титрования» (рис. 1) можно сделать похожей на реальные кривые титрования комплексных потоков отходов, по крайней мере, достаточную для использования в качестве эффективного, но простого алгоритма линеаризации для рН, который легко настраивать и поддерживать.

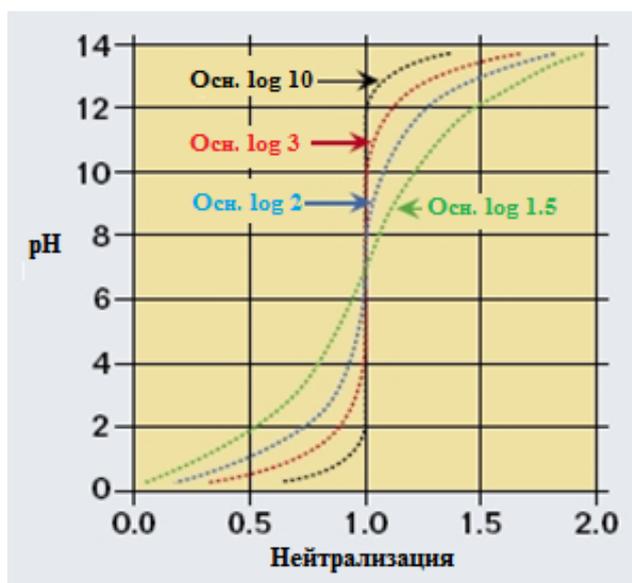


Рисунок 1 – Кривая титрования при изменении основания логарифма

Рассчитанная кривая титрования с модифицированным логарифмическим основанием может быть установлена в электронной таблице для реальной кривой титрования из потока отходов, имеющего характеристики, описанные выше. Для реализации в стратегии управления более важно, чтобы наклоны этих кривых титрования соответствовали ожидаемому диапазону рН, чем для реальных кривых, которые должны совпадать. Это позволяет использовать возможности инициализации ПИД-регулятора, присутствующие в большинстве современных РСУ.

Для интеграции с ПИД-регулятором можно установить дополнительные функциональные блоки для задания уставки рН и величины рН потока (рис. 2). Для управления упреждением с использованием входящего потока потребуется отдельный набор параметров, поскольку этот поток представляет только часть общего источника. Измерения расхода для втекающих потоков могут использоваться, если переменная или расчетная скорость могут использоваться в функциональном блоке характеристики для потоков с потоками, которые не очень заметны.

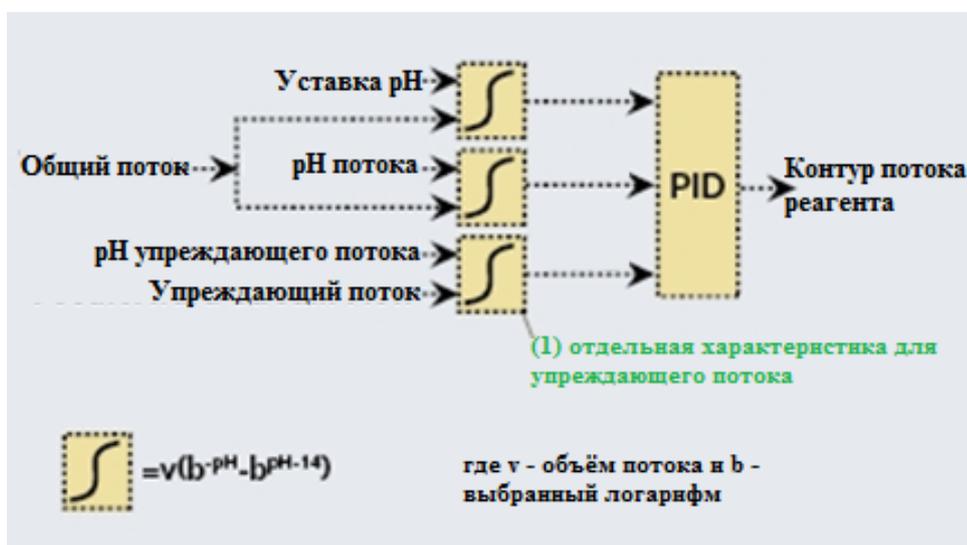


Рисунок 2 – Дополнительные блоки для ПИД-регулятора

Общий эффект заключается в том, что ПИД-регулятор работает полностью на скорости ионного потока, который является линейным, а не рН. Блок ПИД видит только эффективный поток ионов для его уставки, переменной процесса и любого входа с прямой связью. Однако интерфейс оператора по-прежнему находится в единицах рН, что касается фактического ввода уставки и представления переменной процесса. Поскольку ПИД видит по существу линейный вход, больше нет необходимости в адаптивном усилении или планировании усиления. Кроме того, если петля рН каскадируется в контур потока для нейтрализации, то вычисление коэффициента усиления процесса для контура является простым.

Возможности инициализации ПИД-алгоритмов современных РСУ играют важную роль в устранении позиционных погрешностей в рассчитанной кривой титрования. Когда ПИД инициализируется, помещая его в режим выше, чем ручной, интегральный вклад рассчитывается обратно и принимает любой предыдущий вклад от интегрального действия и упреждение, если включено. Это приводит к безударной передаче в более высокий режим. Пропорциональное действие будет являться результатом только последующих изменений уставки или переменной процесса, а действие из любого соединения с прямой связью будет только результатом последующих изменений сигнала прямой связи. По этой причине точность наклона расчетной кривой титрования гораздо важнее, чем ее позиционная точность.

Необходимо соблюдать меры предосторожности при настройке этой стратегии управления рН. Хотя стратегии корректировки усиления больше не нужны, настройка

должна быть выражена через переменные потока ионов (или их процент от масштаба) вместо рН. Это относится также к автотюнерам.

Хотя методика линейризации рН путем изменения логарифмической базы может быть применима к широкому кругу сложных потоков отходов, добавление было сделано для обеспечения большей гибкости за счет учета наличия одной слабой кислоты в значительной концентрации. Это будет выглядеть как одна плоская часть кривой титрования, хотя, возможно, уже есть некоторое уплощение из-за присутствия других кислот. Добавление слабой кислоты к модели сильной кислотно-основной балансировки заряда обеспечивает две дополнительные переменные: фракция слабой кислоты во втекающем и постоянная диссоциации, чтобы лучше соответствовать наклонам более сложных кривых реального титрования. Это обеспечивает некоторую дополнительную гибкость за счет слегка более сложного уравнения характеристик в РСУ. Некоторые примеры, указывающие на широкий спектр форм кривых титрования, показаны на рис. 3.

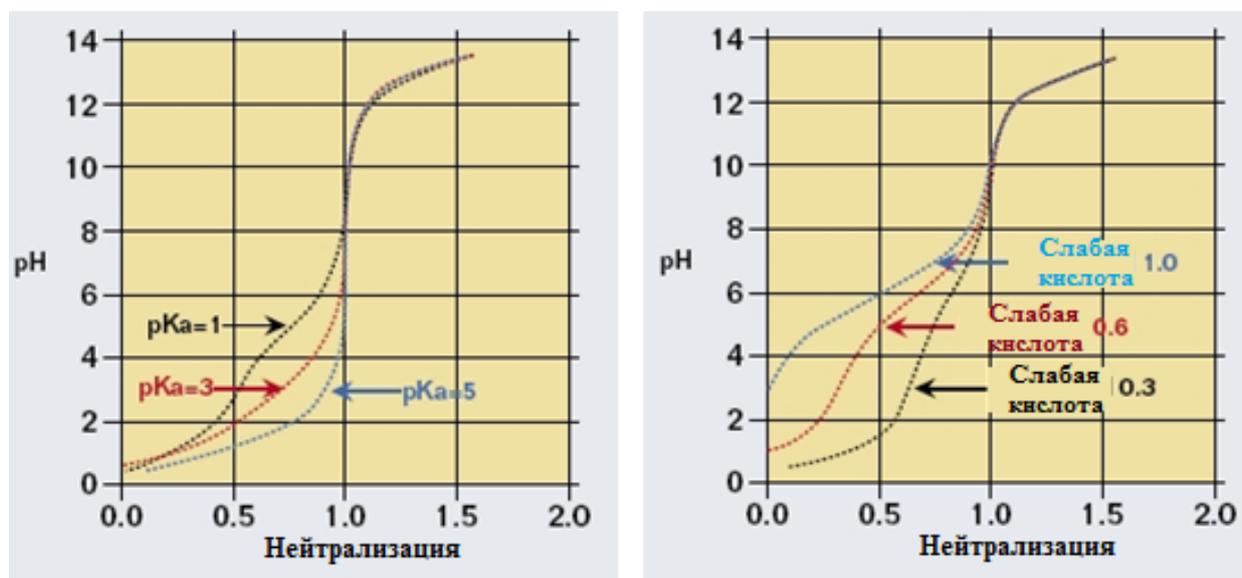


Рисунок 3 – Широкий спектр форм кривых титрования

В заключение, контроль рН можно сделать более простым путем линейризации входов рН в стратегию управления, которая включает в себя переменную процесса и упреждающую передачу, если она присутствует. Если это можно сделать эффективно, можно избежать сложных и недобросовестных стратегий корректировки усиления. Потоки отходов часто являются сложными смесями, которые не имеют четко определенной кривой титрования, характерной для сильной нейтрализации кислоты / основания, или выраженного плато, характерного для кривых титрования слабых или полипротекторных кислот. Для этих потоков простое изменение базы логарифма в определении рН для получения достаточно точной расчетной кривой титрования может использоваться для линейризации ввода рН. Эта характеристика рН имеет только один параметр, который должен быть скорректирован для соответствия различным системам потоков отходов.

Методика решения задачи. Основываясь на сказанном выше, для обеспечения высокой статической и динамической точности поддержания заданной величины рН необходимо линейризовать нелинейную зависимость величины рН от концентрации кислоты или щелочи, т.е. фактически линейризовать нелинейную характеристику датчика рН-метра. Линейность системы будет обеспечена, если в качестве регулируемой величины использовать не величину рН, а преобразованное значение этой величины, а именно обратную функцию зависимости величины рН от концентрации кислоты или щелочи.

Для кислых растворов преобразование осуществляется по выражению:

$$C_{HCl} = 10^{-pH} \quad , \quad (2)$$

для щелочных по выражению:

$$C_{NaOH} = 10^{pH-14} \quad (3)$$

Вид этой зависимости приведен на рис.4, где также концентрация кислоты условно принята отрицательной.

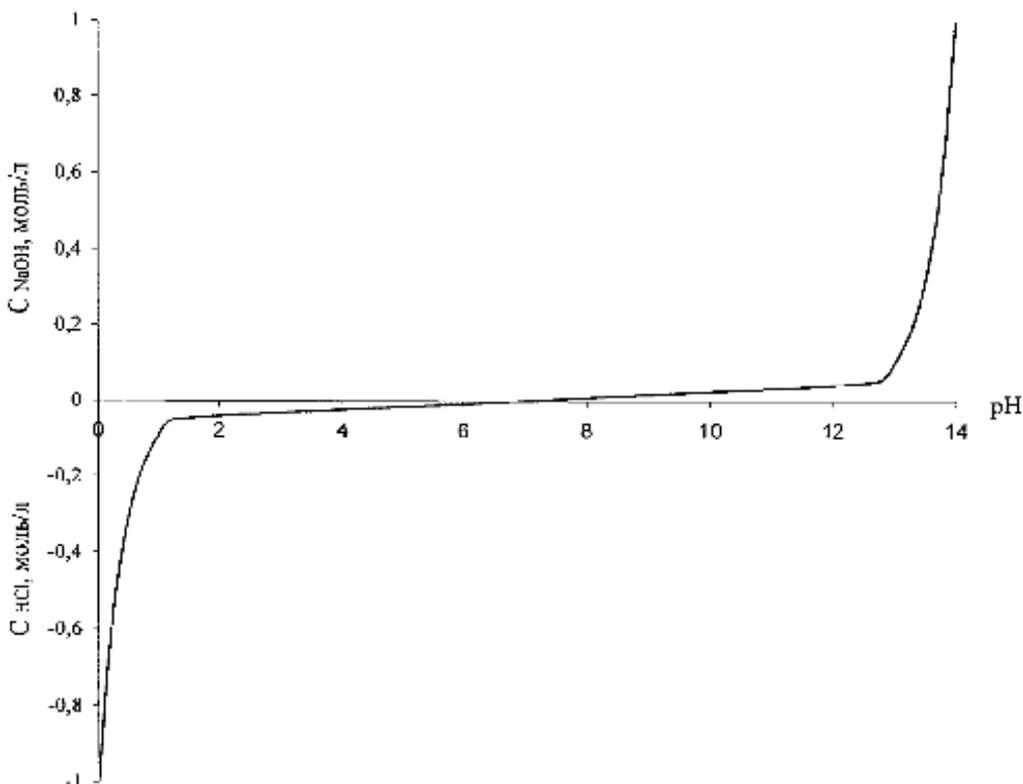


Рисунок 4 - Зависимость концентрации кислоты (щелочи) от pH раствора

Задание регулятору должно быть представлено в тех же единицах, что и регулируемая величина. Поэтому сигнал задания перед подачей на регулятор также должен быть преобразован по вышеприведенным выражениям (2 – 3).

Таким образом, для обеспечения высокой статической и динамической точности управления величиной pH необходимо в качестве регулируемой величины использовать обратную функцию зависимости величины pH от концентрации кислоты или щелочи.

Перечень ссылок

1. Kelahan, R. C. pH linearization lubricates waste control / R. C. Kelahan // Control. – 2005. – October 17. – P. 509.
2. Shinskey, F. G. pH and pION Control in Process and Waste Streams / F. G. Shinskey // Wiley and Sons. – 1973. – 259 p.
3. McMillan, G. K. Advanced pH Measurement and Control / G. K. McMillan, R. A. Cameron // 3rd Edition. – ISA, 2005. – 226 p.
4. Hoover, W. H. Effects of solids and liquid flows on fermentation in continuous culture. IV. pH and dilution rate / W. H. Hoover, C. R. Kincaid, G. A. Varga, W. H. Thayne, L. L. Jr. Junkins. – J. Anim Sci., 1984. – 692 p.
5. Good, N. E. Hydrogen ion buffers for biological research / N. E. Good, G. D. Winget, W. Winter, T. N. Connolly, S. Izawa. – Biochemistry, 1966. – 467 p.