**УДК 621.311**

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ИОНИТНОЙ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ТЭЦ**

**Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонова А.А., Бабиков**[[1]](#footnote-1)\* **О.Е.**

**Аннотация**

Представлена математическая модель процесса регенерации ионитного фильтра водоподготовительной установки. Ионитный фильтр рассмотрен как проточный химический реактор с проходной загрузкой, конечной длины, периодического действия в стационарном режиме. Использованная для описания однопараметрическая диффузионная модель с граничными условиями Данквертса позволяет с достаточной точностью рассчитывать выходные концентрационные кривые реагента продуктов.

**Ключевые слова**: ионитный фильтр, водоподготовительная установка, диффузионная модель, условия Данквертса, регенерация.

В системах производства тепловой и электрической энергии водоподготовительные комплексы являются энерго- и ресурсозатратными и служат основным источником сточных вод, причем высокоминерализированных. К настоящему времени разработаны и на многих ТЭЦ реализованы различные технологии, позволяющие сокращать удельные расходы реагентов и объемы сточных вод. В первую очередь это касается наиболее широко распространенных ионитных методов водоподготовки. Внедрены технологии: блочная компоновка фильтров многоступенчатых водоподготовительных установок (ВПУ), блочно-противоточная регенерация, противоточная регенерация фильтров, отбор и повторное использование отработанных регенерационных растворов (ОРР). При этом режимные характеристики и конструктивные особенности подбирались эмпирическим путем, который не гарантирует оптимальных решений [1,2]. До сих пор не существует целостной модели работы и регенерации ионитных фильтров, адекватно описывающей происходящие процессы.

Целью работы является математическое моделирование процесса регенерации ионитных фильтров на основе фундаментальных законов физики, химии, гидродинамики.

Поскольку ионитный фильтр похож на цилиндр, загруженный неподвижным твердым ионитом, в котором движение воды и раствора реагента происходит вдоль одной оси (z), и протекает химическая реакция обмена реагента на хемосорбированные ионы, логично его рассматривать как проточный химический реактор. Для его описания возможно использовать однопараметрическую диффузионную модель, как наиболее простую, но достаточную для адекватного описания [3,4].

Уравнение сохранения массы компонента согласно конвективным и диффузионным потокам с химической реакцией в проточном реакторе по однопараметрической диффузионной модели (рис.1) имеет вид:

, (1)

где ** – коэффициент продольной диффузии или коэффициент продольного перемешивания,

** – скорость химической реакции гетерогенного ионного обмена,

** – линейная скорость потока через фильтр.

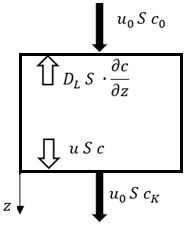


Рис. 1 – Схема потоков на границах и внутри фильтра. S – площадь фильтрования, – начальная и конечная концентрации.

Для решения уравнения диффузионной модели (1) необходимо сделать обоснованные допущения и упрощения. Прямая химическая реакция обмена реагента (reagent) на продукт (product) формально должна быть записана как:

, (2)

где  – концентрация (содержание, доля) продукта в твердой фазе ионита.

По законам химической термодинамики в случае, если в реакции участвует твердое вещество, то его концентрация принимается равной единице. То есть возможно записать:

, (3)

где константа  имеет более сложный смысл, чем константа скорости гомогенной реакции.

Как принято на практике [5], переходим к безразмерной форме записи основного уравнения (1), используя новые безразмерные переменные для координаты: , времени  и для концентрации , где  – длина (высота) фильтра или длина пути. Характеристическое время, . Домножая все члены уравнения (1) на  и разделив на , получаем:

 (4)

Поскольку множитель  – это безразмерный критерий подобия Пекле (), уравнение (4) для реагента запишется:

 (5)

Для продукта () также должно быть подобное уравнение. Для упрощения задачи примем, что химическая реакция – это эквивалентное замещение продукта на реагент в твердой фазе ионита и нет специфического накопления (сорбции) реагента. Тогда сумма вещества реагента (число молей эквивалентов ) и продукта () в жидкой фазе будут равны количеству введенного реагента:.

Для решения уравнения (4) сформулируем задачу и граничные условия. Для процесса регенерации будем считать ионообменный фильтр как: 1 – жидкофазный с проходной загрузкой твердого ионита; 2 – проточный, в стационарном режиме (); 3 – периодического действия (последовательные действия конечного времени); 4 – химический реактор конечной длины; 5 – с необратимой гетерогенной химической реакцией первого порядка; 6 – изотермический; 7 – с идеальной структурой потока ().

Граничные условия для этого случая задаются из условия материального баланса на границах фильтра (условия по Данквертсу). На входе в фильтр сумма потоков вещества, подходящего к границе ( ), должна быть равна потоку вещества, отходящего от границы ( ). В безразмерной форме:

, при (6)

На выходе из фильтра конечной длины предполагается разрыв потока. Химическая реакция останавливается, резко меняется гидродинамическая обстановка:

, при (7)

Для решения задачи получения функции отклика (выходных концентрационных кривых ) на выходе из фильтра в исходном уравнении (5) координата фиксируется на уровне , и единственной переменной остается время .

Кроме того, поскольку фильтр регенерируется с периодической сменой операций с резким изменением условий на границах, целесообразно зонирование или, в терминах времени, разбиение всего процесса на этапы.

Для процесса регенерации фильтра очевидны два этапа:

1 – регенерация – это поступление в фильтр раствора реагента с постоянной концентрацией  (в безразмерной форме), с постоянной скоростью  в течение времени ,

2 – вытеснение реакционной массы водой с концентрацией , с постоянной скоростью () при времени .

При всех сделанных выше допущениях и ограничениях решение уравнения (5) возможно. В результате аналитического интегрирования получено решение в виде семейства однотипных уравнений, включающих параметры модели с учетом экспоненциальной зависимости функции отклика от времени. Семейство уравнений вида  составляет математическую модель всего процесса: регенерации – вытеснения (отмыв) фильтра, включающей характеристики, имеющие физический смысл:

 – нулевая точка времени, соответствует началу пропуска раствора реагента через фильтр,

 – время появления продукта и/или реагента на выходе из фильтра ( ), определяется критерием : ,

 – время пропуска раствора реагента,

– форма выражения количества эквивалентов продукта в ионите, находится из соотношения: ,

 – время достижения концентрации реагента на выходе из фильтра максимального значения, , соответствует переходу от этапа регенерации к этапу вытеснения (отмыва),

 – максимальная концентрация реагента на выходе, ,

 – время достижения концентрации продукта на выходе из фильтра максимального значения,,

 – нормированный показатель скорости гетерогенной реакции,,

 – максимальная концентрация продукта на выходе,.

На рис. 2 представлены расчетные выходные концентрационные кривые реагента и продукта при различных , позволяющие наглядно представить характеристики модели.

Рис. 2 – Выходные концентрационные кривые реагента (Re) и продукта (P) при различных Pe, при условии →∞*, .*

Сопоставление теоретических (расчетных) значений выходных концентраций с экспериментальными данными, полученными при регенерации промышленного ионитного фильтра, показывает хорошее соотвествие. На рис. 3 представлены выходные концентрационные кривые щелочи, диоксида кремния (продукт 1) и органических веществ (продукт 2) при регенерации анионитного фильтра Ⅱ ступени ХВО-2 Нижнекамской ТЭЦ-1 2,6% щелочным регенерационным раствором со скоростью потока, 7,08 м/ч, временем подачи PP  60 мин. Диаметр фильтра , длина пути в фильтре ( ). Загрузка – высокоосновный анионит. Относительное количество эквивалентов десорбированного диоксида кремния , органических веществ – 0,004.

По диффузионной модели были рассчитаны параметры реального процесса. Значение критерия (). Это означает, что в фильтре с данными конструкционными характеристиками (, , объем загрузки ионита, диаметр зерна ионита) и режимными характеристиками (, , ) реализуется гидродинамический режим, промежуточный между идеальным вытеснением и идеальным смешением. Практически посередине. Кажущаяся константа скорости десорбции  5 ч- 1 (18000 с- 1). Время полуреакции (время десорбции половины сорбированного   ) 8,5 мин. То есть реакция протекает со средней скоростью, достаточной для выделения и отмыва большей части (но не 100%) из фильтра. Для органических веществ К=0,22, время полуреакции 3,5 часа. То есть за время регенерации удаляется только часть органических веществ, что объясняет происходящее со временем «отравление» ионита.

Рис. 3 – Выходные концентрации реагента , продукта 1, продукта 2 (органические вещества) при регенерации анионитного фильтра Ⅱ ступени. Сплошные линии – расчет по диффузионной модели.

Полученные данные показывают, что реализуемый режим регенерации и конструкция фильтра не позволяет достичь режима идеального вытеснения, при котором возможны теоретически минимальный расход реагента, минимальный объем стоков и максимальный выход продукта. Следовательно, есть большой простор для совершенствования как конструкции, так и технологии регенерации.

**Литература**

1. Рябчиков Б.Е., Пантелеев А.А., Ларионов С.Ю. Ионный обмен в водоподготовке. – М.: ДеЛи плюс, 2018 г. – 398 стр.

2. B.M. Larin, E.B. Yurchevskii. “Problems of Ion-Exchange and Membrane Water Treatment Technologies in Power Engineering”, Therm. Eng. Vol. 66, 2019, 744 – 749 p.

3. N.D. Chichirova, A.A. Chichirov, S.M. Vlasov, I.E.Filippov, “A one-parameter diffusion model systems TPP – open thermal network”, Transactions of Academenergo, vol. 3, 2012, 75 – 85 p.

4. Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Ляпин А.И., Филиппов И.Е. Анализ процессов в системе ТЭЦ – открытая тепловая сеть с использованием модели реактора вытеснения с рециркуляцией. Промышленная энергетика. 2014 г, № 11, 21 – 26 стр.

5. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты технических технологий. Часть Ⅰ – СПб: «Мир и Семья», 2004 г. – 848 стр.

1. \* Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, РТ, Россия, e- mail: Olegsey1998@yandex.ru [↑](#footnote-ref-1)