

ОБЩАЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 661.525(686.5)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА
НЕЙТРАЛИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ

С. М. НУБАРЯН, В. Л. ПЕРОВ и М. А. НУБАРЯН

Московский химико-технологический институт им. Д. И. Менделеева
НИИ Автоматика, Кировакан

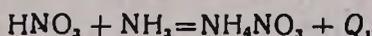
Поступило 15 V 1986

Разработана математическая модель процесса нейтрализации азотной кислоты газообразным аммиаком в производстве аммиачной селитры для агрегатов большой единичной мощности. В отличие от существующих моделей, базирующихся на определении рН среды, отражена взаимосвязь выходной концентрации селитры с расходами, температурами входных реагентов и концентрацией кислоты.

На основании результатов проведенного активного эксперимента установлена адекватность модели процессу. Математическая модель предназначена для использования в системе автоматического управления технологическим процессом.

Рис. 1, табл. 1, библиографические ссылки 9.

В производстве аммиачной селитры основным узлом является аппарат использования тепла нейтрализации (ИТН), где слабая азотная кислота нейтрализуется газообразным аммиаком:



где Q — тепло реакции.

Реакция нейтрализации является практически необратимой и протекает с большой скоростью без образования побочных продуктов. Тепло реакции используется на испарение воды в аппарате ИТН, приносимой азотной кислотой. За счет использования тепла нейтрализации на выходе аппарата ИТН получают растворы аммиачной селитры концентрацией до 91—92% и большое количество сокового пара, частично используемого в технологической схеме производства [1].

О полноте протекания реакции нейтрализации судят по величине рН среды выходных продуктов. Поэтому существующие схемы управления процессом традиционно строятся по принципу регулирования соотношения входных реагентов с коррекцией по рН среды [1, 5, 6, 7]. Взаимосвязь между рН среды раствора селитры и сокового пара с входными технологическими параметрами также показана в математических моделях процесса нейтрализации, приведенных в работах [3, 4]. Оценка качества процесса нейтрализации только по одному выходному параметру рН среды недостаточна, т. к. этот параметр не дает возможности судить о концентрации выходного продукта. Кроме того, измерение рН, а тем более, управление по этому параметру представляют определенные трудности из-за существенной нелинейности его характеристики [8].

Целью настоящей работы является разработка математической модели процесса нейтрализации азотной кислоты газообразным аммиаком в аппарате ИТН, отражающей зависимость концентрации раствора аммиачной селитры от расходов и температуры реагентов, концентрации азотной кислоты и температуры в реакторе. Вводимые в модель допущения и упрощения позволяют ее использовать в системе автоматического управления производством аммиачной селитры с помощью ЭВМ.

Аппарат ИТН состоит из двух частей: реакционной и промывной. В первой части аппарата, в свою очередь, можно выделить реакционную, сепарационную и циркуляционную зоны [1, 2]. Для построения математической модели процесса нейтрализации рассмотрим только реакционную часть аппарата ИТН, которую представим комбинированной моделью идеального перемешивания с постоянным объемом и с рециклом по контуру идеального вытеснения. Уравнения гидродинамики процесса имеют следующий вид:

$$\frac{M}{K+1} \frac{dC_{ac}}{dt} = \frac{1,27}{K} G_k C_k - G_{ac} C_{ac} \quad (I)$$

$$\frac{\partial C_{ac}}{\partial t} = - \frac{4V_c R}{\pi(D^2 - d^2)} \cdot \frac{\partial C_{ac}}{\partial h} \quad (II)$$

где C_{ac} — концентрация раствора селитры, %; C_k — концентрация азотной кислоты, %; G_k — расход кислоты, кг/ч; G_{ac} — расход селитры на выходе из аппарата, кг/ч; K — коэффициент сверхстехиометрической нагрузки по кислоте; M , R , V_c — средняя масса, кг; кратность циркуляции, объемная скорость растворов в аппарате ИТН, м³/ч; h — высота реакционной части аппарата ИТН, м; $D - d$ — кольцевой зазор циркуляционной зоны, м.

Для решения уравнения I необходимо определить расход раствора селитры на выходе из аппарата ИТН, который находится из совместного решения уравнений материального и теплового балансов, а также задать начальные условия. Допустим, что в циркуляционной зоне аппарата не происходит химической реакции. Тогда из уравнения II следует, что изменения концентрации селитры по высоте циркуляционной зоны не происходит и, следовательно, во времени концентрация ее будет также постоянной и равной концентрации в реакционной зоне аппарата.

Уравнение материального баланса:

$$G_k + G_a = G_{ac} + G_{сп} + G_{к. пот} \quad (III)$$

где G_a — расход аммиака, кг/ч; $G_{сп}$ — расход сокового пара на выходе аппарата, кг/ч; $G_{к. пот}$ — потери непрореагировавшей кислоты, кг/ч.

Для полного поглощения аммиака кислота подается в некотором избытке, за счет чего возникают ее потери:

$$G_{к. пот} = G_k - \frac{370,6}{G_k} G_a \quad (IV)$$

Здесь $\frac{370,6}{C_k} G_a$ — требуемое количество кислоты для полного поглощения аммиака.

Подставляя IV в III, получим:

$$\dot{G}_{сн} = G_a \left(1 - \frac{370,6}{C_k} \right) - G_{ac} \quad (V)$$

Уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned} G_k C_p^k (T_k - 18) + G_a C_p^a (T_a - 18) + Q_n = \\ = G_{ac} C_p^{ac} T_p + G_{сн} L + Q_{пот.к} + Q_{пот.ст} + Q_p^{ac} \end{aligned} \quad (VI)$$

где C_p^k, C_p^a, C_p^{ac} — теплоемкости C_p кислоты, аммиака, селитры; T_k, T_a, T_p — температуры кислоты, аммиака и в реакторе, °C; Q_n — тепло нейтрализации, получаемое в реакторе, кДж; $Q_{пот.к}$ — потери тепла с непрореагировавшей кислотой, кДж; Q_p^{ac} — теплота растворения аммиачной селитры, кДж; $Q_{пот.ст}$ — потери тепла через стенку аппарата, кДж; L — удельная теплота парообразования, кДж/кг.

Объединяя уравнения V и VI и исключив $G_{сн}$, определим количество аммиачной селитры на выходе из аппарата ИТН.

$$G_{ac} = \frac{A}{B}, \quad (VII)$$

где

$$\begin{aligned} A = G_k C_p^k (T_k - 18) + G_a [C_p^a (T_a - 18) - (1 - 370,6/C_k) L] + \\ + Q_n - Q_{пот.к} - Q_{пот.ст} - Q_p^{ac} \\ B = C_p^{ac} \cdot T_p - L \end{aligned}$$

Теплоемкости веществ, теплоты нейтрализации и растворения селитры при различных нагрузках определяются линейными интерполяционными зависимостями по данным, приведенным в [1, 9].

$$Q_n = [2027 - 6,86(100 - C_k)] G_a \quad (VIII)$$

$$Q_p^{ac} = \left(-\frac{1069 \cdot G_a}{G_a + G_k} + 359 \right) G_a \quad (IX)$$

$$C_p^k = 0,000717 T_k - 0,0033 C_k + 0,832 \quad (X)$$

$$C_p^a = 0,00037 T_a + 0,5 \quad (XI)$$

В выражении VIII также учитывается теплота разбавления азотной кислоты в зависимости от ее концентрации. Величины тепловых потерь через стенку аппарата в окружающую среду и с непрореагировавшей кислотой в зависимости от нагрузки аппарата ИТН определяются по следующим выражениям:

$$Q_{пот.ст} = \frac{\alpha_{окр} (T_{ст} - T_{окр}) 769,25}{G_a} \quad (XII)$$

$$Q_{\text{пот. к}} = \left(G_{\text{к}} - \frac{370,6}{C_{\text{к}}} G_{\text{н}} \right) C_{\text{р}}^* T_{\text{р}}, \quad (\text{XIII})$$

где $\alpha_{\text{окр}}$ — коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата в окружающую среду; $T_{\text{ст}}$, $T_{\text{окр}}$ — температуры стенки аппарата и окружающей среды, °С.

Коэффициент сверхстехиометрической нагрузки по кислоте равен

$$K = \frac{0,0027 G_{\text{к}} \cdot C_{\text{к}}}{G_{\text{н}}} \quad (\text{XIV})$$

Для решения уравнений гидродинамики I и II необходимо знать кратность циркуляции раствора селитры в аппарате ИТН. Кратность циркуляции R является параметром в этих уравнениях, который зависит от величины выходной нагрузки $G_{\text{ас}}$. Параметр R определяется путем идентификации модели с экспериментальными данными при разных нагрузках аппарата. При идентификации в качестве сигнальных воздействий использовались ступенчатые возмущения по расходу кислоты и аммиака. По результатам идентификации была получена функциональная зависимость кратности циркуляции от выходной нагрузки в рабочем диапазоне аппарата ИТН, которая имеет следующий вид:

$$R = 3,161 - 0,027 G_{\text{ас}} + 72,44 e^{-0,347 G_{\text{ас}}} \quad (\text{XV})$$

Расчеты модели проводились на ЭВМ ЕС-1022, результаты приведены в таблице.

Расчетные и экспериментальные значения точек кривых отклика

Таблица

$G_{\text{ас}}$, кг/ч	R	$C_{\text{ас}}$, %	t мин											Ошибка, %	
			0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20		22
14500	3,2	модель	88,7	88,3	88,0	87,7	87,5	87,3	87,1	87,0	86,7	86,7	86,6	86,5	0,6
		экспер.	88,7	88,6	88,5	88,3	88,0	87,7	87,5	87,1	86,5	86,2	86,0	86,0	
16700	2,9	модель	87,0	87,5	87,8	88,1	88,4	88,5	88,7	88,8	88,9	—	—	—	0,5
		экспер.	87,0	87,2	87,5	87,7	88,1	88,7	88,9	89,2	89,2	—	—	—	
19200	2,7	модель	88,5	88,2	87,6	87,3	86,9	86,7	86,5	86,3	86,1	86,0	—	—	0,9
		экспер.	88,5	88,3	88,1	88,0	87,7	87,2	86,5	85,7	85,3	85,2	—	—	
28900	2,4	модель	81,1	80,7	80,4	80,2	80,0	79,9	79,8	79,7	79,7	—	—	—	0,4
		экспер.	81,1	81,0	80,8	80,5	80,1	79,7	79,6	79,5	79,5	—	—	—	

Как видно из таблицы, экспериментальные и расчетные кривые отклика сходятся достаточно точно, при этом максимальная ошибка модели в статике составила не более 6%. Полученные точностные оценки модели позволяют считать ее адекватной объекту.

Таким образом, процесс получения аммиачной селитры в аппарате ИТН математически описывается уравнениями I, II, V и VII—XV. Одна-

ко необходимо отметить, что при $K < 1$ (когда поступающий аммиак находится в избытке) уравнения математической модели несколько изменятся, а именно:

$$G_{сн} = G_k (1 - 0,0027C_k) - G_{ас} \quad (XVI)$$

$$G_{ас} = \frac{A}{B}, \quad (XVII)$$

где

$$A = G_k [C_p^* (T_k - 18) - (1 + 0,0027C_k) \cdot L] + G_a C_p^* (T_a - 18) + Q_{II} - Q_{пот. а} - Q_{пот. ст} - Q_p^{ac},$$

$$B = C_p^* \cdot T_p - L$$

$$Q_{пот. а} = (G_a - G_{a.тр}) \cdot C_p^* \cdot T_p, \quad (XVIII)$$

где $G_{a.тр} = 0,0027G_k C_k$ — требуемое количество аммиака.

Во все уравнения модели, кроме XIV, подставляется $G_{a.тр}$.

На рисунке приведена блок-схема алгоритма решения математической модели.

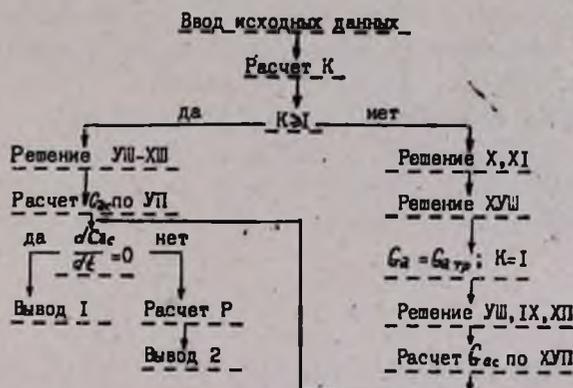


Рис. Блок-схема алгоритма решения математической модели: вывод 1 — решение модели в статике; вывод 2 — решение модели в динамике.

Таким образом, установлена зависимость кратности циркуляции раствора селитры от нагрузки аппарата ИТН. Предлагаемая модель дает возможность оценить значения рН растворов аммиачной селитры в аппарате по коэффициенту сверхстехиометрической нагрузки поступающей азотной кислоты.

ԶԵՃՈՔԱՑՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ ԱՄՈՆԻԱԿԱՅԻՆ ՍԵԼԻՏՐԱՅԻ ԱՐՏԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳՈՒՄ

Ս. Մ. ՆՈՒՐԱՐՅԱՆ, Վ. Լ. ՊԵՐՈՎ և Մ. Հ. ՆՈՒՐԱՐՅԱՆ

Մեծ հզորության ազրեզատներում ամոնիակային սելիտրայի արտադրության համար մշակված է գազային ամոնիակով ազոտական թթվի շեղբացման պրոցեսի մաթեմատիկական մոդելը: Ի տարբերություն գոյություն ունեցող մո-

դիվերսի, որոնք հիմնված են միջավայրի PH-ի որոշման վրա, ստացված մոդելում արտածված է սելիտրայի կոնցենտրացիայի փոխադարձ կապը մոլտ-քային ռեագենտների ծախսերի, ըերմաստիճանների և ադոտական թթվի կոնցենտրացիայի հետ:

Կատարված ակտիվ փորձերի արդյունքների հիման վրա ցույց է տրված մոդելի և պրոցեսի համապատասխանությունը:

Մաթեմատիկական մոդելը նախատեսված է տեխնոլոգիական պրոցեսի ավտոմատ կառավարման համակարգում օգտագործման համար:

A MATHEMATICAL MODEL OF THE NEUTRALIZATION PROCESS IN THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF AMMONIUM NITRATE PRODUCTION

S. M. NOUBARIAN, V. L. PEROV and M. H. NOUBARIAN

A mathematical model of nitric acid neutralization process by gaseous ammonia in ammonium nitrate production for great single power units has been developed.

Unlike the existing models, based on the pH determination of the medium in this model allowance is made for the interconnection between nitrate output concentration expenditures, input reagent temperatures, and acid concentration.

The adequacy of the model, as well as of the process, has been demonstrated on the basis of results obtained from active experiments. The mathematical model is intended to be used in the automatic control system of technological processes.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Технология аммиачной селитры./Под ред. Олевского В. М. — М., Химия, 1978, 312 с.
2. Миниович М. А. — Производство аммиачной селитры. М., Химия, 1974, 209 с.
3. Дубинский Я. И., Рысин Г. Ш., Перов В. Л., Кафаров В. В. — В сб. «Автоматизация химических производств». — М., НИИТЭХИМ, 1975, № 3, с. 14.
4. Егоров А. Ф. — Разработка алгоритмического обеспечения для решения задач адаптивного управления химико-технологическими процессами в интенсивных режимах. Автореферат на соиск. уч. ст. канд. хим. наук. М., МХТИ, 1979.
5. Ажогин В. В. — Исследование и разработка системы автоматической оптимизации процесса нейтрализации в производстве аммиачной селитры. Автореферат на соиск. уч. ст. канд. хим. наук. Киев, КПИ, 1972.
6. Самуров И. А. — Автоматизация процесса нейтрализации, Азотная промышленность, технико-эконом. информ., ГИАП, 1966, № 12, с. 71.
7. Пат. Румынии № 51207 (1965).
8. Harriot P. — Process Control. McGraw-Hill, 1984, p. 348.
9. Атрощенко В. И., Каргин С. Н. — Технология азотной кислоты. М., Химия 1970, 496 с.