

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ

УДК 66.012-52:661.525.3:532.135

Е.И. Проказа

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ

Введение

В условиях современного рынка для гарантирования конкурентоспособности химических предприятий необходимо обеспечить получение качественного продукта с минимально возможными расходами. Производство аммиачной селитры (ammonium nitrate) в Украине на данное время составляет более 2 млн тонн в год, характеризуется большим энерго- и ресурсопотреблением и требует значительных затрат на переработку и утилизацию отходов. Производство аммиачной селитры — непрерывный и многостадийный процесс, требует высокоэффективного контроля и управления для безопасного ведения технологического процесса. Главная стадия производства аммиачной селитры — нейтрализация. Эффективность управления этой стадией в значительной степени определяет эффективность всего производства аммиачной селитры в целом [1]. В ходе нейтрализации выделяется большое количество тепла, используемого для выделения воды, которая вносится с неконцентрированной азотной кислотой. Превышение температуры в аппарате нейтрализации приводит к росту потерь в производстве аммиачной селитры, выбросов вредных веществ в атмосферу и создает взрывоопасную ситуацию.

Аммиачная селитра — не только минеральное удобрение, но и стратегическое сырье для многих отраслей химического производства, поэтому актуально совершенствование управления технологическим оборудованием по ее изготовлению за счет уменьшения энергетических и технологических расходов. Учитывая, что азотная кислота и аммиак производятся другими подразделениями азотного комплекса, основная задача относительно улучшения производства аммиачной селитры может быть решена за счет совершенствования существующих и разработки новых систем автоматизированного контроля и управления.

Современные агрегаты производства аммиачной селитры имеют ряд специфических особенностей, которые нужно учитывать при разработке систем автоматизации [2]. Большая мощность и последовательная структура схемы производства аммиачной селитры задают повышенные требования относительно надежности контроля, регулирования и защиты, поскольку выход из строя отдельного элемента часто приводит к полной остановке аппарата использования тепла нейтрализации (ИТН) и, как следствие, к большим экономическим потерям. Организация управления объектами такого типа требует пересмотра традиционных схем управления и нового подхода к разработке систем контроля, автоматического регулирования и автоматизированных систем управления.

© Е.И. ПРОКАЗА, 2017

*Международный научно-технический журнал
«Проблемы управления и информатики», 2017, № 3*

Для автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) характерно наличие вычислительной подсистемы, которая обеспечивает математическую и логическую обработку информации по заданным алгоритмам, разработку и применение управляющих воздействий на регуляторы или непосредственно на исполнительные механизмы. На нее полностью или частично переносятся функции информационной подсистемы, а также функция контроля работы системы противаварийной защиты [3]. Рассмотрены возможные направления малорасходной модернизации агрегата аммиачной селитры в [4]. Отличие технико-экономических показателей производства аммиачной селитры в зависимости от особенностей конкретных технологических схем находится, главным образом, в области расходов энергоресурсов, которые зависят от концентрации используемой неконцентрированной азотной кислоты и утилизации тепла нейтрализации. Анализ многотоннажных агрегатов получения азотной кислоты АК-72М и аммиачной селитры АС-72М, с точки зрения их управления, проведенный в [5], позволил выделить особенности этих объектов: во-первых, они являются последовательной структурой производства конечного продукта; во-вторых, технологические линии и узлы агрегатов технологически и информационно взаимосвязаны, а сами агрегаты характеризуются относительной автономностью. Предлагается распределенная система управления, которая позволяет повысить оперативность, надежность, безопасность и эффективность управления. В работе [6] предложены новые химико-технологические решения по производству аммиачной селитры, которые позволяют получить удобрения высшего качества и улучшить экологические условия производства. Но все эти мероприятия не учитывают сложность объектов управления и взаимосвязь всех параметров технологического процесса производства аммиачной селитры.

АСУТП производства аммиачной селитры на современных предприятиях представляет собой распределенную систему контроля и управления. Системы автоматического регулирования, которые входят в АСУТП производств аммиачной селитры, как правило, направлены на стабилизацию отдельных технологических параметров, к которым относят регулирование соотношения потоков азотной кислоты и аммиака для обеспечения материального и стехиометрического баланса реакции за счет изменения расхода азотной кислоты и стабилизацию ее концентрации в растворе аммиачной селитры на выходе из аппарата ИТН за счет изменения расхода аммиака [7, 8]. При этом концентрацию азотной кислоты в растворе аммиачной селитры измеряют косвенным потенциометрическим методом по концентрации водорода в реакционной зоне и в растворе аммиачной селитры на выходе из ИТН. По их разнице изменяется расход азотной кислоты, которая подается в барботерную систему аппарата ИТН. При этом не учитывают, что водородный показатель, который определяется платиновыми электродами, недостоверен, так как раствор в реакционной зоне еще находится в зоне реологического перехода, в котором имеет место совокупность непрореагировавшей азотной кислоты, аммиака, аммиачной селитры и других составляющих, что достаточно сильно влияет на показание pH -метров. Такой способ управления технологическим процессом несовершенен, так как, во-первых, температура реакционной массы на протяжении некоторого времени может повышаться за счет запаздывания изменения расхода неконцентрированной азотной кислоты, во-вторых, не позволяет контролировать непосредственно температуру как основной влияющий фактор и, в-третьих, надежность и точность управления достаточно низкая.

Постановка проблемы

Аппарат нейтрализации относится к сложным многопараметрическим объектам управления, который формально имеет четыре входные регулируемые координаты: концентрацию раствора аммиачной селитры, концентрацию азотной кислоты в этом растворе, температуру реакции и давление сокового пара и три регулирующих коор-

динаты: расходы неконцентрированной азотной кислоты, аммиака и сокового пара. Кроме того, на этот процесс достаточно сильно влияют многие факторы, такие как количество воды в азотной кислоте, температура материальных потоков и др. В научной литературе недостаточно исследован аппарат нейтрализации азотной кислоты газообразным аммиаком как сложный многопараметрический объект управления. Поэтому один из важных факторов улучшения эффективности управления процессом нейтрализации — разработка способов управления, которые позволяют учитывать многопараметричность аппарата нейтрализации как объекта управления.

Технологические процессы в химической технологии сопровождаются реологическими переходами [9, 10], основой которых является перенос массы, энергии и импульса. Наличие того или другого реологического перехода приводит к изменению технологических параметров, а соответственно и эффективности технологического процесса. Именно поэтому для описания технологического процесса в аппарате нейтрализации предлагается использовать теорию реологических переходов.

В научно-технической литературе практически не приводятся результаты исследований термодинамического режима работы аппарата нейтрализации. Указывается, что температура в зоне реакции не должна превышать 165 °С, температура раствора аммиачной селитры на выходе из аппарата ИТН должна находиться в диапазоне 150–160 °С. Превышение температуры в реакционной зоне аппарата ИТН больше 165 °С приводит к термическому разложению аммиачной селитры, увеличению выбросов продуктов реакции с соковым паром и уменьшению производительности аппарата нейтрализации. Снижение температуры раствора аммиачной селитры ниже 150 °С может вызвать ее кристаллизацию. Конденсат сокового пара, как побочный продукт производства, используется в небольших количествах для охлаждения аппарата нейтрализации только в тех случаях, когда температура реакционной массы достигает предельно допустимого значения [11]. Также не учитывается изменение температуры в зависимости от высоты поднятия раствора аммиачной селитры в реакционном стакане и другие параметры, непосредственно влияющие на процесс нейтрализации.

Таким образом, из анализа современных способов автоматического управления процессом производства аммиачной селитры можно сделать вывод, что известные принципы управления не обеспечивают необходимого энерго- и ресурсосбережения, поэтому цель настоящей публикации — улучшить работу аппарата нейтрализации за счет усовершенствования существующей и разработки новой системы автоматического управления процессом нейтрализации с использованием теории реологических переходов.

Для достижения этой цели необходимо решить такие основные задачи:

- 1) исследовать физико-химические процессы объекта управления (аппарата нейтрализации) и разработать физические и математические модели процесса нейтрализации на основе теории реологических переходов;
- 2) усовершенствовать систему автоматического управления соотношением потоков азотной кислоты и аммиака в аппарате нейтрализации;
- 3) разработать систему управления температурным режимом процесса в аппарате нейтрализации.

Материалы исследований

Для решения первой задачи исследовались физико-химические процессы в аппарате нейтрализации и было установлено, что процесс нейтрализации в производстве аммиачной селитры сопровождается массо- и теплопереносом [12]. Согласно теории реологических переходов [9, 10] процесс нейтрализации сопровождается тремя фазовыми реологическими переходами:

- 1) реологический переход азотной кислоты и газообразного аммиака в раствор аммиачной селитры;
- 2) реологический переход теплоты реакции в теплоту нагревания раствора аммиачной селитры и сокового пара;
- 3) реологический переход воды, которая вносится с азотной кислотой, в соковый пар.

Физическая модель процесса нейтрализации показана в форме реологических переходов (рис. 1).

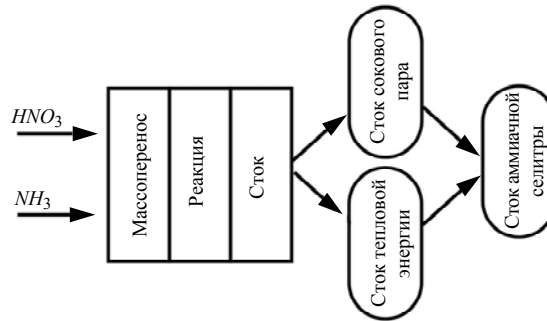


Рис. 1.

Для описания физико-химических процессов в аппарате нейтрализации были разработаны физические модели реологических переходов [13, 14].

На рис. 2 показаны схема физической модели (а) и графики (б–г) необратимых реологических преобразований для реологического перехода азотной кислоты и газообразного аммиака в раствор аммиачной селитры. Между реагирующими компонентами массой m_i и раствором аммиачной селитры массой M_{an} в реакционной зоне аппарата нейтрализации есть условная граница раздела, на которой протекает химическое преобразование реагирующих веществ. Раствор аммиачной селитры из этой зоны постоянно выводится (стекает) из аппарата нейтрализации и подается для дальнейшего преобразования. На рис. 2, б показано изменение во времени массы реагирующих компонентов, а на рис. 2, в — изменение во времени массы аммиачной селитры. Реологическое преобразование в реакционной зоне может быть представлено интегральной импульсной дельта-функцией Дирака (график г).

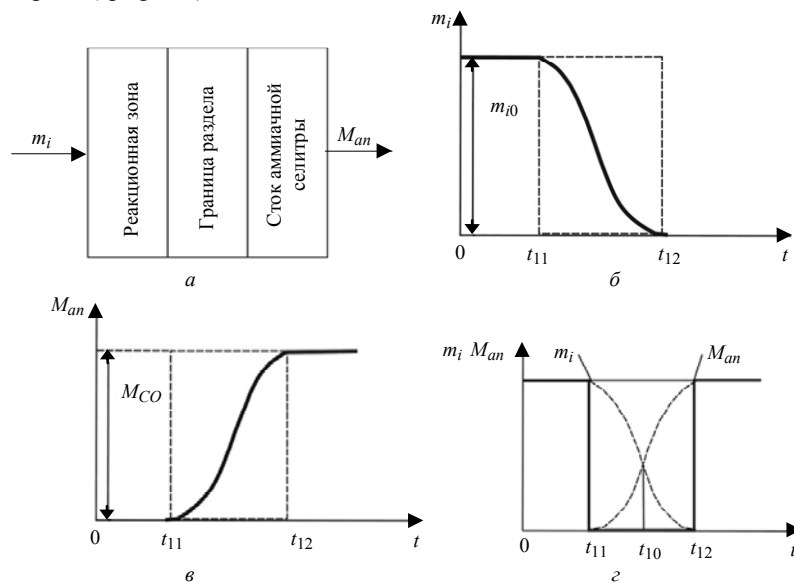


Рис. 2

Процесс переноса массы в реакционной зоне аппарата нейтрализации описывается уравнением (1). Левая часть уравнения (1) характеризует массоперенос в жидкой фазе, а правая — процесс создания нового вещества (аммиачной селитры):

$$\frac{\partial m_i}{\partial \theta} + D_i \nabla^2 m_i + v_i \nabla m_i = \gamma_{an}. \quad (1)$$

Здесь v_i — скорость движения i -го вещества в направлении массопереноса; γ_{an} — интенсивность стока аммиачной селитры за единицу времени t ; D_i — эффективный коэффициент диффузии при массопереносе i -го вещества; ∇ — оператор Гамильтона.

В аналогичной форме разработаны физические модели и графики необратимых реологических преобразований для других реологических переходов: процесс реологического преобразования теплоты реакции в теплоту нагревания раствора аммиачной селитры и сокового пара описывается уравнением (2):

$$M_{an} c_{an} \left(\frac{\partial T_P}{\partial \theta} + a_{an} \nabla^2 T_P + v_T \nabla T_P \right) = \gamma_T. \quad (2)$$

Здесь M_{an} — масса теплоносителя (аммиачной селитры); c_{an} — теплоемкость аммиачной селитры; T_P — температура реакции; v_T — скорость изменения тепловой энергии; γ_T — интенсивность стока тепловой энергии; a_{an} — коэффициент температуропроводности аммиачной селитры.

Процесс реологического преобразования воды, которая вносится со слабой азотной кислотой, в соковый пар, описывается уравнением (3)

$$\frac{\partial m_w}{\partial \theta} + D_w \nabla^2 m_w + v_w \nabla m_w = \gamma_{SP}. \quad (3)$$

Здесь m_w — масса воды; v_w — скорость превращения воды; γ_{SP} — интенсивность стока сокового пара; D_w — эффективный коэффициент процесса превращения воды.

На основе уравнений (1)–(3) были разработаны математические модели процесса нейтрализации [15]. Получено нелинейное дифференциальное уравнение, которое описывает процесс переноса тепловой энергии:

$$\frac{\partial T_P(\xi, \theta)}{\partial \theta} + D_T \frac{\partial^2 T_P(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} = \frac{d}{dt} \left(\tau_{T2}^2 \frac{d^2 T_P(t)}{dt^2} + \tau_{T1} \frac{T_P(t)}{dt} + T_P(t) \right). \quad (4)$$

Здесь $T_P(\xi, \theta)$ — температура в реакционной зоне аппарата нейтрализации в направлении ξ за время θ ; D_T — коэффициент эффективной термодиффузии; $T_P(t)$ — температура стока раствора аммиачной селитры из реакционной зоны; τ_{T1} , τ_{T2} — постоянные времени стока тепловой энергии.

Для решения уравнения (4) использовался метод нулевого градиента, согласно которому на границе раздела фаз интегральные импульсные дельта-функции Дирака тождественно равны нулю [10], в результате получена система линейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial T_P(\xi, \theta)}{\partial \theta} = -D_T \frac{\partial^2 T_P(\xi, \theta)}{\partial \xi^2}; \quad (5)$$

$$\tau_{T2}^2 \frac{d^2 T_P(t)}{dt^2} + \tau_{T1} \frac{T_P(t)}{dt} + T_P(t) = 0.$$

В ходе их совместного решения и дальнейших математических преобразований получена математическая модель для температурного поля в аппарате нейтрализации [16]:

$$T(x) = \frac{k_T T_P \sqrt[3]{0,5L} \sqrt[6]{F_{name}^M - k_2 F_{SP}^M}}{\sqrt[6]{D_T V \rho_{an} (1 - Q_{na})}} \times \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{\alpha x S_H}{((F_{na}^M + k_1 F_{SP}^M) / \rho_{na}) (1 + k_p k_A^{na} (Q_A / Q_{na}))} \right) \times \right. \\ \times \left[\cos \left(\frac{\omega_0 x S_H}{((F_{na}^M + k_1 F_{SP}^M) / \rho_{na}) (1 + k_p k_A^{na} (Q_A / Q_{na}))} \right) + \right. \\ \left. \left. + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \left(\frac{\omega_0 x S_H}{((F_{na}^M + k_1 F_{SP}^M) / \rho_{na}) (1 + k_p k_A^{na} (Q_A / Q_{na}))} \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Здесь F_{name}^M — массовый расход азотной кислоты (mass consumption of nitric acid); F_{SP}^M — массовый расход сокового пара; Q_{na} , Q_A — концентрация азотной кислоты и аммиака соответственно; ρ_{an} , ρ_{na} — плотность раствора аммиачной селитры и азотной кислоты; k_T , k_p , k_1 , k_2 — коэффициенты; α — степень уменьшения температуры по высоте; ω_0 — параметр, характеризующий степень изменения температуры в аппарате нейтрализации по высоте; x — текущая высота реакционного стакана; k_A^{na} — коэффициент соотношения расходов аммиака и азотной кислоты; V — объем аппарата нейтрализации; L — высота реакционного стакана; S_H — поперечное сечение реакционного стакана.

Аналогично получена математическая модель массопереноса реакционной массы в аппарате нейтрализации:

$$M_{an}(t) = M_{an0} \left\{ 1 - \exp \left(- 2t \frac{v_i^2}{D_i} k_{\tau M} \right) \left[1 + \exp \left[2t \frac{v_i^2}{D_i} (1 - k_{\tau M}) \right] \right] + \exp \left[- 2t \frac{v_i^2}{D_i} (1 + k_{\tau M}) \right] \right\}, \quad (7)$$

где $k_{\tau M} = \frac{\tau_{22}}{\tau_{12}} = \frac{D_i}{2F_{na}} \left(\frac{S_H}{L} \right) \left[\frac{1}{1 + k_A^{na} + k_{XP}^{na}} \right]^2 (1 + k_{an}^{na})$ — коэффициент соотношения постоянных времени процесса массопереноса химического преобразования $\tau_{22} = D_i / 2v_i^2$ и стока $\tau_{12} = V / F_{an}$; F_{an} — объемный расход раствора аммиачной селитры; $k_A^{na} = F_A / F_{na}$ — коэффициент соотношения расходов аммиака F_A и азотной кислоты F_{na} ; $k_{an}^{na} = F_{an} / F_{na}$ — коэффициент соотношения расходов аммиачной селитры F_{an} и азотной кислоты F_{na} ; $k_{XP}^{na} = F_{XP} / F_{na}$ — коэффициент соотношения расходов продуктов химического преобразования F_{XP} и азотной кислоты F_{na} .

На базе предложенных уравнений разработаны математические модели реологических переходов процесса нейтрализации. Полученные уравнения описывают процессы тепло- и массопереноса в аппарате нейтрализации, используя посто-

янные времени этих процессов. Уравнение (6) показывает, что один из главных параметров, влияющих на процесс теплопереноса в аппарате нейтрализации, — массовый расход сокового пара F_{SP}^M , что позволяет использовать это при разработке способа управления температурным режимом. Из анализа математической модели массопереноса реакционной массы в аппарате нейтрализации (7) можно сделать вывод, что управление процессом нейтрализации можно осуществлять не только путем стабилизации соотношения потоков азотной кислоты и аммиака, а также используя соотношение постоянных времени $k_{\tau M} = \tau_{22} / \tau_{12}$ массопереноса, которые непосредственно характеризуют процесс химического превращения и сток аммиачной селитры.

Для решения второй задачи исследовались математические модели, которые показали, что использование для управления процессом нейтрализации только системы автоматического управления соотношением потоков азотной кислоты и аммиака и стабилизации содержания азотной кислоты в растворе аммиачной селитры недостаточно [19]. На основе исследований была усовершенствована система управления соотношением потоков азотной кислоты и аммиака путем введения корректирующего сигнала, используя коэффициент соотношения постоянных времени массопереноса в регулирующем алгоритме соотношения этих потоков [2]. Структурная схема управления процессом нейтрализации с корректировкой по коэффициенту соотношения постоянных времени показана на рис. 3, где $МК_1$ — микроконтроллер который рассчитывает соотношение расходов азотной кислоты и аммиака, $МК_2$ — микроконтроллер, который рассчитывает коэффициент соотношения постоянных времени массопереноса.

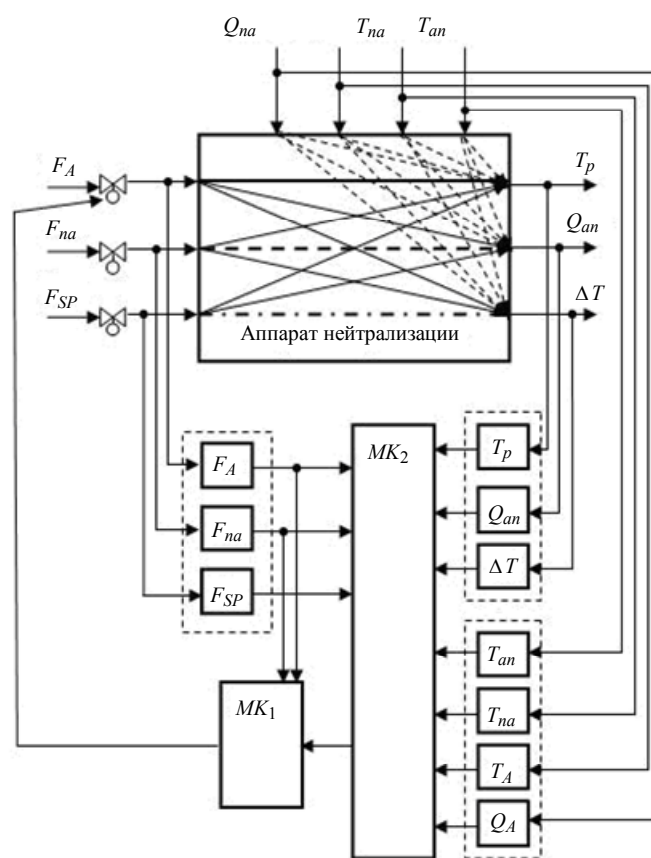


Рис. 3

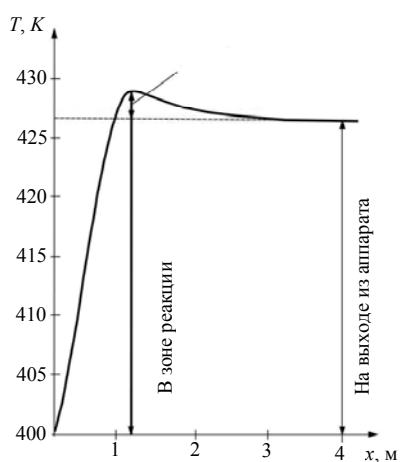


Рис. 4

повторного использования сокового пара [20]. На рис. 4 изображено распределение температуры по высоте x в реакционной массе.

За счет испарения воды из раствора аммиачной селитры проходит некоторое охлаждение реакционной массы, поэтому имеет место разница температур в зоне реакции T_P и на выходе из аппарата нейтрализации T_{an} , которая характеризует тепловые процессы, протекающие в аппарате нейтрализации.

Исследования показали, что влияние такой разницы на эффективность технологического процесса нейтрализации достаточно сильное. Кроме того, установлено, что распределение температуры в аппарате нейтрализации азотной кислоты неравномерно для разных значений соотношения расходов азотной кислоты и аммиака. Разница температур в зоне реакции и на выходе из аппарата нейтрализации (температурная депрессия) описывается уравнением

$$\Delta T(t) = \Delta T_0 \left[1 - \exp(-tK_{SP}F_{SP}) \left[1 - \exp\left(-2t\left(\frac{v_T^2}{a_H}\right)\right) \right] + K_{T0} \left[1 - \exp\left(-2t\left(\frac{v_T^2}{a_H}\right)\right) \right] \right], \quad (8)$$

где $\Delta T_0 = T_{P0} - T_{an0}$ — разница номинальных значений температуры в реакционной зоне и раствора аммиачной селитры на выходе аппарата соответственно; K_{SP}, K_{T0} — коэффициенты.

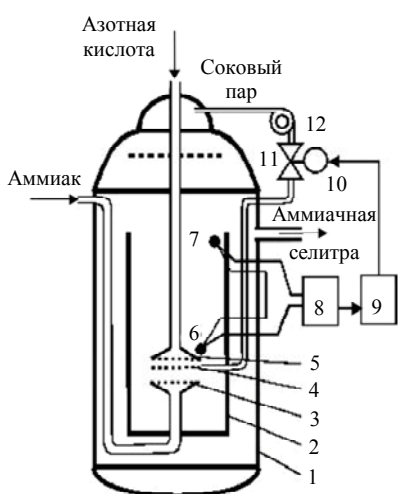


Рис. 5

В результате экспериментальных исследований предложенной системы управления установлено, что для всех исходных координат аппарата нейтрализации уменьшилась дисперсия и среднее квадратичное отклонение (СКО) больше чем в два раза, что свидетельствует о повышении точности, а соответственно и об улучшении эффективности технологического процесса.

Для решения третьей задачи исследовался процесс теплопереноса в аппарате нейтрализации на основе разработанных моделей. Установлено, что стабилизировать температурное поле в нем можно за счет

На основе проведенных исследований была предложена система управления температурным режимом аппарата нейтрализации по разнице температур путем подачи сокового пара в реакционную зону [21, 22], функциональная схема которой представлена на рис. 5. Температуры T_P и T_{an} контролируются термодатчиками, включенными встречно, причем термодатчик, который измеряет температуру T_P в реакционной зоне, располагается в точке максимальной температуры, а термодатчик, который измеряет температуру T_{an} раствора аммиачной селитры, располагается на выходе из аппарата нейтрализации.

Это позволило уменьшить разницу температур больше, чем в два раза, тем самым существенно улучшить эффективность управления процессом нейтрализации.

Результаты исследований предложенной системы управления представлены на рис. 6. На рис. 6, а, б наблюдается зона стабильности температуры (заштрихованная), при значениях расхода сокового пара 0,5–1,2 кг/с, а концентрации азотной кислоты от 0,3 до 0,6, что позволяет вести процесс в оптимальном режиме. Распределение температуры по высоте x реакционной массы при разных значениях расхода сокового пара показано на рис. 6, в, г.

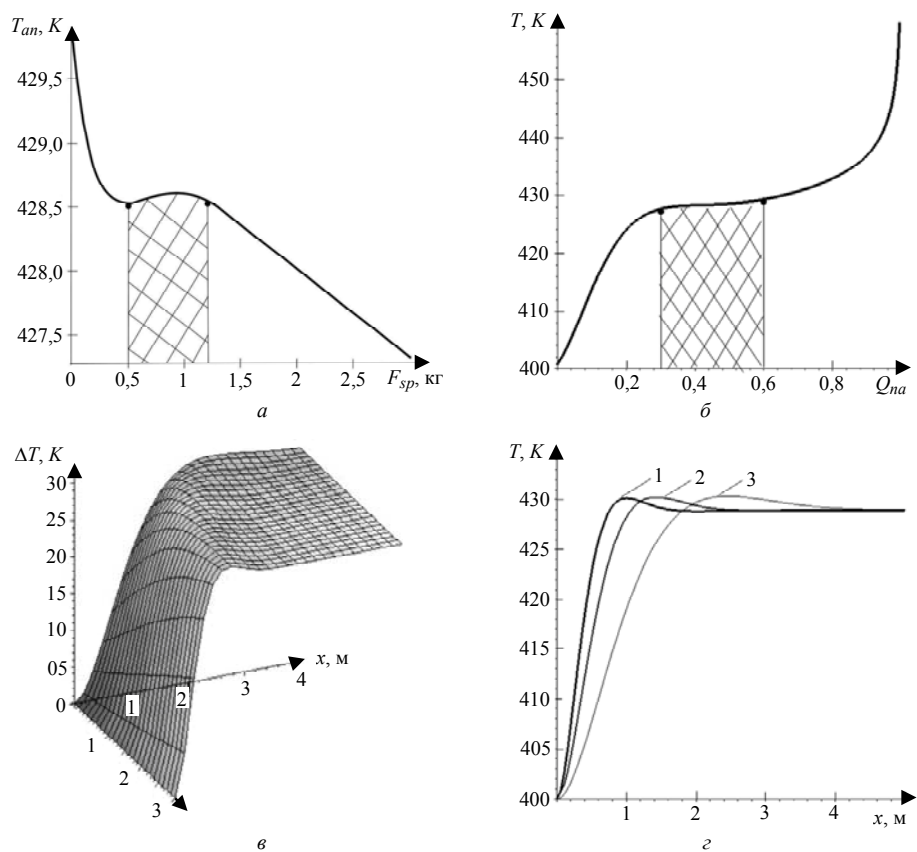


Рис. 6

Проведены теоретические и экспериментальные исследования без введения сокового пара и при его введении с массовым расходом $F_{SP}^M = 1,1$ кг/с и $F_{SP}^M = 2,2$ кг/с. При введении в кольцевые барботеры сокового пара наблюдается некоторое смещение максимальной температуры по высоте реакционной массы, которое увеличивает кратность циркуляции раствора аммиачной селитры, повышает скорость испарения воды из азотной кислоты и увеличивает количество пара в реакционной зоне, а за счет большой теплоемкости сокового пара происходит поглощение тепла химической реакции, которое способствует стабилизации температурного режима процесса нейтрализации. В результате уменьшения количества аммиачной селитры и азотной кислоты в соковом паре увеличивается производительность работы аппарата нейтрализации приблизительно на 2,5 %.

Изучение результатов других исследователей и сопоставление с полученными результатами указывает на верное направление, которое получило развитие в настоящей работе, для улучшения автоматического управления процессом нейтрализации, что подтверждает адекватность полученных результатов. Так, в [23] предложена система управления процессом нейтрализации, в которой выполняется непрерывный контроль массовой части воды в растворе аммиачной селитры,

что позволяет увеличить качество конечного продукта, снизить потери аммиака и аммиачной селитры и энергозатраты на ее дальнейшее выпаривание. В [24] используется метод эксергии для оценки потерь аммиака и аммиачной селитры и их влияния на окружающую среду. Существенный результат этого исследования — возвращение загрязняющих веществ в технологический процесс, благодаря этому увеличивается производительность процесса, снижаются вредные выбросы в окружающую среду, а также уменьшается энергопотребление за счет более эффективного использования тепла реакции. Совсем другой подход использован в работе [25]. Моделирование и управление реактором нейтрализации осуществлено на базе модели Винера, которая имеет каскадную структуру, что позволяет повысить точность и эффективность технологического процесса.

Заключение

Таким образом, используя теорию реологических переходов, улучшено работу аппарата нейтрализации за счет усовершенствования существующей и разработки новой систем управления процессом нейтрализации.

Разработаны физические модели для трех фазовых реологических переходов при массо- и теплопереносе и показано, что такие фазовые переходы описываются интегральными импульсными дельта-функциями Дирака. В итоге для каждого реологического перехода получены нелинейные дифференциальные уравнения, которые описывают физико-химические процессы в зоне реологических переходов и сток массы аммиачной селитры, сокового пара и тепловой энергии. Разработаны математические модели процесса нейтрализации в виде аналитических соотношений, полученных на основе решения дифференциальных уравнений теории реологических переходов, за счет использования метода нулевого градиента. Установлено, что процесс тепло- и массопереноса в аппарате нейтрализации зависит от постоянных времени этих процессов, что важно для построения алгоритмов управления таким сложным многопараметрическим объектом. Один из главных параметров, который влияет на процесс теплопереноса в аппарате нейтрализации, — массовый расход сокового пара F_{SP}^M , что позволяет использовать это при разработке способа управления температурным режимом. Установлено, что обеспечение общего материального баланса процесса нейтрализации можно выполнять не только за счет стабилизации соотношения потоков азотной кислоты и аммиака, а также по соотношению постоянных времени $k_{\tau M} = \tau_{22} / \tau_{12}$ массопереноса, которые характеризуют собственно процесс химического превращения и сток аммиачной селитры.

Усовершенствована система стабилизации соотношения потоков азотной кислоты и аммиака путем введения корректирующего сигнала по коэффициенту соотношения постоянных времени массопереноса в регулирующий алгоритм соотношения этих потоков. В результате анализа полученных результатов экспериментальных исследований установлено, что для всех исходных координат аппарата нейтрализации уменьшилась дисперсия и СКО больше, чем в два раза, что свидетельствует о повышении точности, а соответственно и о повышении эффективности технологического процесса.

Исследован температурный режим аппарата нейтрализации и установлено, что стабилизировать температурное поле в нем можно за счет повторного использования сокового пара. Предложена система управления температурным режимом аппарата нейтрализации по разнице температур в зоне реакции и на выходе из аппарата нейтрализации путем введения сокового пара в реакционную зону. Это позволило стабилизировать температурный режим процесса нейтрализации, уменьшить разницу температур больше, чем в два раза, и тем самым существенно улучшить эффективность управления процессом, а также повысить производительность этого процесса приблизительно на 2,5 % за счет повторного использования сокового пара.

О.І. Проказа

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ РЕОЛОГІЧНИХ ПЕРЕХОДІВ

Використовуючи теорію реологічних переходів, розроблено фізичні та математичні моделі, які описують процеси масо- і теплопереносу в апараті нейтралізації. Удосконалено систему стабілізації співвідношення потоків азотної кислоти і аміаку шляхом введення коригуючого сигналу за коефіцієнтом співвідношення постійних часу масопереносу в регулюючий алгоритм співвідношення цих потоків. Запропоновано систему керування температурним режимом апарата нейтралізації за різницею температур в зоні реакції і на виході з апарата нейтралізації шляхом введення сокового пару в реакційну зону.

E.I. Prokaza

AUTOMATED CONTROL OF NEUTRALIZATION TECHNOLOGICAL PROCESS OF AMMONIUM NITRATE BY THE PRINCIPLES OF RHEOLOGICAL TRANSITIONS

Using the theory of rheological transitions there are developed physical and mathematical models that describe the processes of mass and heat transfer in the apparatus of neutralization. Improved system of stabilization of the correlation flow of nitric acid and ammonia through the introduction of a correction signal by coefficient of correlation of the time constants of mass transfer to the regulation algorithm of correlation of these flows. Proposed thermal control system of neutralization apparatus by the thermal difference in the reaction zone and the out neutralization apparatus by introducing the steam into the reaction zone.

1. *Erben A.* From neutralization to granulation // Nitrogen & Methanol. — 1999. — **241**, N 5. — P. 49–52.
2. *Производство аммиачной селитры в агрегатах большой единичной мощности / М.Е. Иванов, В.М. Олевский, Н.Н. Поляков и др.* — М.: Химия, 1990. — 228 с.
3. *Азизов А.М.* Информационные системы контроля параметров технологических процессов. — Л.: Химия, 1983. — 328 с.
4. *Митронов А.П., Мудрый А.П., Кочергин А.Н.* Направления модернизации производственного комплекса: азотная кислота — аммиачная селитра // Химическая промышленность Украины. — 2000. — № 1–2. — С. 30–34.
5. *Адылов Ф.Т., Турапина Н.Н., Перекрестов В.В.* Система управления технологическим процессом производства слабой азотной кислоты и аммиачной селитры в агрегатах АК-72М и АС-72М на ферганском ПО «Азот» // Промышленные контроллеры АСУ. — 2004. — № 4. — С. 1–6.
6. *Щегров Л.Н., Манк В.В., Новиков И.Н., Антрапцева Н.М.* Азотные удобрения. Пути производства аммиачной селитры улучшенного качества // Химическая промышленность Украины. — 2004. — № 6. — С. 9–10.
7. *Миниович М.А.* Производство аммиачной селитры. — М.: Химия, 1974. — 239 с.
8. *Патент України № 43404, С01N27/48.* Спосіб автоматичного управління процесом нейтралізації кислоти у виробництві аміачної селітри в апараті використання тепла нейтралізації / А.О. Анохін, С.В. Белік, Л.Ю. Довгалов, П.М. Циглевський, М.В. Чистоклетов. Оpubл. 17.12.2001. Бюл. №11.
9. *Гораздовский Т.Я.* Научные основы реологии. — Луганск: Изд-во ун-та им. В. Даля, 2009. — 699 с.
10. *Стенцель Й.І.* Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів. Ч. 2 // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. — 2007. — № 5(111). — С. 91–96.

11. *Erben A., Kaupas P.* Ammonium nitrate production and operational experience // *Nitrogen & Methanol*. — **235**, N 5. — P. 25–34.
12. *Таганов И.Н.* Моделирование процессов массо- и энергопереноса. — Л. : Химия, 1979. — 203 с.
13. *Поркуян О.В., Стенцель Й.І., Проказа О.І.* Реологічні моделі технологічного контролю параметрів з внутрішніми зв'язками у виробництві аміачної селітри // Харківський політехнічний інститут. Електроенергетика та перетворювальна техніка. — 2010. — № 12. — С. 21–28.
14. *Стенцель Й.І., Поркуян О.В., Проказа О.І.* Дослідження вимірювального контролю технологічних параметрів при реологічних перетвореннях хімічних процесів // Там же. — 2011. — № 19. — С. 31–36.
15. *Поркуян О.В., Стенцель Й.І., Проказа О.І.* Дослідження математичної моделі апарату нейтралізації у виробництві аміачної селітри // Східноєвропейський журнал передових технологій. — 2010. — **47**, № 5/6. — С. 19–21.
16. *Стенцель Й. І., Проказа О.І., Поркуян О.В.* Математичні моделі управління апаратом нейтралізації кислоти за температурою реакції у виробництві аміачної селітри. Ч. 2 // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. — 2012. — **186**, № 15. — С. 114–122.
17. *Патент на корисну модель № 62220, МПК F02C9/26.* Спосіб керування багатопараметричними технологічними об'єктами / Й.І. Стенцель, О.В. Поркуян, О.І. Проказа; заявник та патентовласник Технологічний інститут СХУ ім. В. Даля (м. Северодонецьк). — Опубл. 25.08.2011. Бюл. №16.
18. *Стенцель Й.І., Поркуян О.В., Проказа О.І.* Основи теорії багатопараметричних об'єктів керування з реологічними переходами // Технологічні комплекси. — 2010. — № 2. — С. 46–51.
19. *Stentsel I., Porkuyan O., Prokaza E.* Researches of the system of neutralization process control in the production of ammonium nitrate on the basis of rheological transitions principles // An International journal on motorization, vechicle, operation, energy efficiency and mechanical engineering «ТЕКА Commission of motorization and Energetics in Agriculture». — 2012. — **12**, N 4. — P. 274–278.
20. *Проказа О.І.* Математичні моделі термодинамічних процесів в реакційній склянці апарата нейтралізації аміачної селітри // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. — 2015. — № 18. — С. 142–147.
21. *Проказа О.І.* Теоретичні основи управління апаратом нейтралізації азотної кислоти за температурною депресією у виробництві аміачної селітри. Ч. 1 // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. — 2013. — **194**, № 15. — С. 222–228.
22. *Патент України на винахід № 110520, C01B21/48.* Спосіб керування процесом нейтралізації азотної кислоти у виробництві аміачної селітри / Й.І. Стенцель, О.І. Проказа, К.А. Літвінов. Опубл. 12.01.2016. Бюл. № 1.
23. *Dovgalov L., Ushakova O., Shilin S.* Automated control and monitoring system for technological processes in ammonium nitrate production // *Chemistry & Chemical Technology*. — 2013. — **7**, N 3. — P. 176–178.
24. *Kirova-Yordanova Z.* Application of the exergy method to environmental impact estimation: The ammonium nitrate production as a case study // *Energy*. — 2010. — **35**, N 8. — P. 32221–3229.
25. *Maciej Lawrynczuk.* Modelling and predictive control of a neutralization reactor using sparse support vector machine Wiener models // *Neurocomputing*. — 2016. — **205**. — P. 311–328.

Получено 06.12.2016