

УДК 66.011

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ,  
ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ГИБКОСТИ  
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ХТС  
ТОНКОГО ОРГАНИЧЕСКОГО СИНТЕЗА**

**С.И. Дворецкий, С.Г. Толстых, Е.В. Пешкова**

*Кафедра «Технологии продовольственных продуктов»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; topt@topt.tstu.ru*

**Ключевые слова и фразы:** кинетика; конструктивные и режимные переменные; математическое моделирование; неопределенные параметры; оптимизация; производство азопигментов; реакция диазотирования; системный анализ; турбулентный трубчатый реактор; энерго- и ресурсосберегающие химико-технологические системы.

**Аннотация:** Рассмотрен подход к анализу системных связей и закономерностей функционирования и развития энерго- и ресурсосберегающих химико-технологических систем в условиях частичной неопределенности. Предлагаемый подход реализован на примере процесса диазотирования, осуществляемого в турбулентном трубчатом реакторе. Проведено исследование статических режимов функционирования трубчатой реакторной установки и областей допустимых режимов при влиянии возмущающих воздействий (неопределенных параметров). Сформулированы и решены задачи оптимизации конструктивных и режимных переменных реакторной установки диазотирования трубчатого типа.

**Обозначения**

$A$  – кинетический коэффициент растворения твердой фазы амина;  
 $a$  – тип аппаратного оформления;  
 $C(\cdot)$  – целевая функция оптимизации;  
 $c$  – концентрация, моль/м<sup>3</sup>;  
 $d, z$  – векторы конструктивных и режимных (управляющих) переменных;  
 $E$  – энергия активации, Дж/моль;  
 $G$  – расход, м<sup>3</sup>/с;  
 $g(\cdot)$  – вектор технологических ограничений;  
 $Izb$  – избыток нитрита натрия в реакционной зоне;  
 $K$  – выход диазосоединения, %;  
 $l$  – длина трубчатой части реактора, м;  
 $n$  – порядок реакции;  
 $Q$  – производительность реакторной установки, т/год;  
 $T$  – температура, К;  
 $\gamma^{(i)}$  – распределение нитрита натрия,  $i = 1, 2, 3, \dots$ , %;

$\xi$  – вектор неопределенных параметров;  
 $\Pi$  – количество вещества в продуктах реакции диазотирования;  
 $\Pi_\chi$  – количество диазосмол, %;  
 $\Pi_\sigma$  – количество нитрозных газов, %;  
 $\Pi_\eta$  – проскок амина, %;  
 $\Omega$  – область допустимых режимов функционирования ХТС.

**Индексы**

$A$  – ароматический амин  $ArNH_2$ ;  
 $AK$  – азотистая кислота;  
ном – номинальное значение;  
 $CK$  – соляная кислота;  
 $D$  – диазосоединение  $ArN_2Cl$ ;  
 $N$  – нитрит натрия;  
 $s$  – твердая фаза;  
 $\sigma$  – нитрозные газы;  
 $\chi$  – диазосмолы.

## Введение

В Стратегии развития химической и нефтехимической промышленности на период до 2015 года [1] предусматривается техническое перевооружение, модернизация действующих и создание новых экономически эффективных и экологически безопасных химических производств. Для повышения эффективности производственных процессов в различных сферах народного хозяйства и улучшения качества жизни и здоровья населения усилия научного потенциала направляются на разработку и реализацию «прорывных» инновационных проектов, технологических процессов по выпуску конкурентоспособной продукции, материалов со специфическими эксплуатационными свойствами (сверхпрочности, твердости, химо-термостойкости, химической и каталитической активности и др.), экономически эффективных, экологически безопасных и ресурсосберегающих технологий. Определены важнейшие направления химической промышленности: обновленный ассортимент лакокрасочной продукции, красителей широкой цветовой гаммы, пигментов, текстильно-вспомогательных веществ с повышенными потребительскими свойствами на базе гибких, модульных технологических процессов с использованием широкой сырьевой основы; обновленный ассортимент продукции малотоннажной химии (сорбенты, катализаторы, абсорбенты, адсорбенты, добавки к полимерным материалам, химические реактивы и особо чистые вещества, ингибиторы, комплексоны и др.).

В связи с этим являются актуальными:

1) теоретические и прикладные исследования кинетики химических процессов, системных связей и закономерностей функционирования и развития энерго- и ресурсосберегающих химико-технологических систем (ХТС) в условиях частичной неопределенности параметров сырья, технологических переменных и коэффициентов математической модели;

2) определение и исследование: а) областей допустимых режимов функционирования, гибкости (работоспособности) химико-технологических процессов (ХТП) в пространстве режимных (управляющих) переменных; б) допустимых областей изменения неопределенных (известных с точностью до некоторого интервала значений) параметров сырья, технологических переменных и коэффициентов математической модели ХТС, в пределах которых обеспечивается заданное регламентом производства (в смысле безопасности, энерго- и ресурсосбережения и качества выпускаемой продукции) функционирование ХТС.

## Объект и предмет исследования

Объектом исследования является непрерывный процесс диазотирования в производстве азопигментов, который включает стадии растворения твердой фазы ароматического амина  $ArNH_2$  в водном растворе соляной кислоты и обработки суспензии солянокислого  $ArNH_2$  нитритом натрия  $NaNO_2$ . При этом протекают реакции диазотирования (основные реакции), а также реакции образования диазотирующего агента и побочных продуктов (нитрозных газов, диазосмол, диазоаминосоединений). Наиболее вероятные реакции, протекающие при проведении процесса диазотирования, кинетические уравнения и их коэффициенты определены в работах [2, 3].

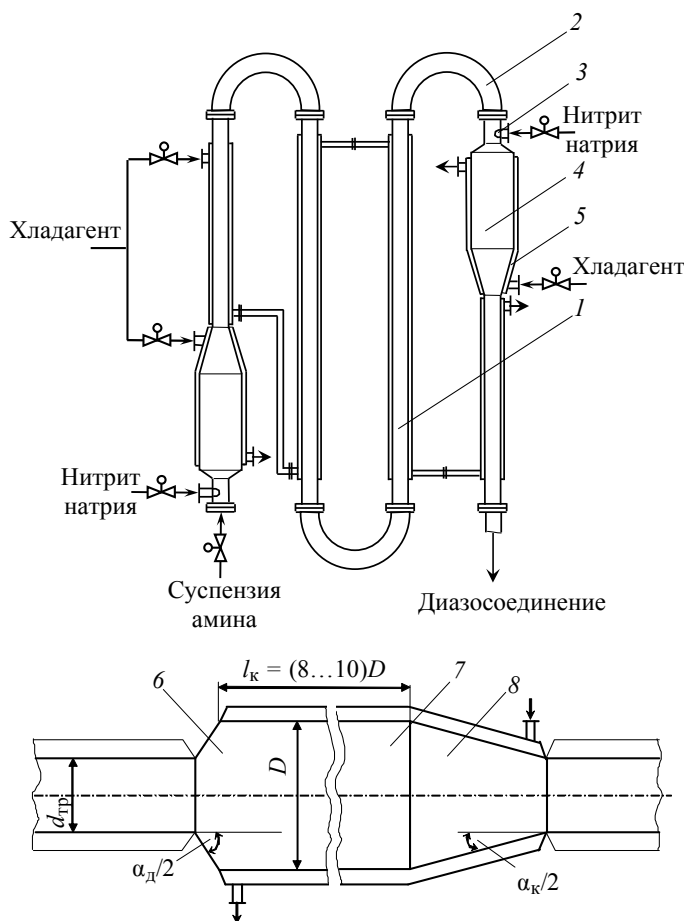
Предметом исследования являются методы системного анализа, физического исследования и математического моделирования, оптимизации и совершенствования аппаратурно-технологического оформления.

Для реализации непрерывного процесса диазотирования предлагается использовать турбулентный трубчатый реактор комбинированного типа с диффузор-

конфузорными устройствами турбулизации потока реакционной массы (рис. 1). Как показали экспериментальные исследования [4, 5], одинаковое время пребывания частиц в трубчатом реакторе обеспечивается при развитом турбулентном режиме течения потока, который достигается при значениях Рейнольдса  $Re > 10\ 000$ . При этом длина трубчатой части реактора определяется необходимым для растворения кристаллов амина временем пребывания в нем реакционной массы.

Отличительной особенностью малогабаритного турбулентного трубчатого реактора (см. рис. 1) является наличие диффузор-конфузорных устройств турбулизации потока, работоспособность которых определяется условиями обеспечения турбулентности гидродинамического режима течения. Основными параметрами, определяющими эти условия, являются диаметр диффузор-конфузорных камер смешения  $D$ , диаметр трубчатой части реактора  $d_{тр}$ , длина диффузор-конфузорной камеры  $l_k$ , углы расширения диффузора  $\alpha_d$  и сужения конфузора  $\alpha_k$ , а также концентрация амина в питании реактора.

В диффузор-конфузорных устройствах с углом расширения  $\alpha_d > 40$  происходит полный отрыв потока от стенок диффузора с образованием интенсивных обратных токов и завихрений. Отрыв потока распространяется дальше на участок



**Рис. 1. Турбулентный трубчатый реактор непрерывного действия (в вертикальном исполнении):**  
 1 – трубчатый модуль; 2 – колено; 3 – форсунки для распыления нитрита натрия;  
 4 – диффузор-конфузорное устройство; 5 – теплообменная рубашка;  
 6 – диффузор; 7 – прямой участок; 8 – конфузор

постоянного сечения за диффузором, поэтому чтобы сгладить турбулизацию потока реакционной среды за диффузором, необходимо наличие участка цилиндрической формы. На этом участке полное выравнивание потока по сечению достигается на расстоянии  $l_k = (8 \dots 10)D$ .

Конфузор служит для окончательного выравнивания потока при переходе из камеры смешения в трубчатую часть реактора. Для выравнивания профиля скорости потока целесообразно принять угол сужения конфузора  $\alpha_k = 30 \dots 40^\circ$ .

Таким образом, отдельная секция реактора состоит из устройства смешения, смонтированного на входе в аппарат; трубчатой части и диффузор-конфузорных устройств турбулизации потока.

Такие аппараты весьма эффективны не только для проведения химических процессов, но и для интенсивного смешения компонентов с целью гомогенизации жидкости. Они успешно могут использоваться в качестве смесителей (для получения целевого продукта), предреакторов (для приготовления исходной реакционной смеси), малогабаритных реакторов (для проведения быстрых химических реакций), а также осуществления массообменных процессов.

Основными элементами (модулями) турбулентных аппаратов трубчатого типа являются смеситель на входе в аппарат, секции вертикальных труб с теплообменными рубашками (по 5–10 труб в каждой секции, соединенных последовательно), соединенных между собой диффузор-конфузорными устройствами турбулизации потока реакционной массы или камерами смешения в аппаратах комбинированного типа. Подача раствора нитрита натрия осуществляется равномерно по длине трубчатой части реактора через форсунки, установленные непосредственно перед диффузор-конфузорными устройствами той или иной секции реакторной установки или непосредственно в камеры смешения комбинированного аппарата.

Таким образом, при моделировании процесса diazotирования учитываются процессы:

- 1) смешения дозируемых в аппарат исходных реагентов в камере смешения, установленной на входе в аппарат;
- 2) химического взаимодействия ароматического амина с diazотирующим агентом (азотистой кислотой) в трубчатой части аппарата и в камерах смешения (в аппаратах комбинированного типа);
- 3) изменения гидродинамических режимов протекания элементарных процессов химического взаимодействия в устройствах турбулизации потока реакционной массы.

Техническое задание на проектирование реакторных установок diazотирования включает регламентные и проектные ограничения:  $Q = 1000$  т/год;  $K \geq 98$  %;  $P_\eta \leq 0,5$  %;  $P_\chi \leq 0,5$  %;  $P_\sigma \leq 1$  %;  $7 \text{ моль/м}^3 \leq c_{AK} \leq 14 \text{ моль/м}^3$ .

При заданной производительности  $Q = 1000$  т/год работоспособность реакторной установки diazотирования обеспечивается допустимыми значениями концентрации твердой фазы амина  $[c_A^{(0)}]_s = 300 \dots 400 \text{ моль/м}^3$  и диаметром вертикальной трубы трубчатой части реактора  $d_{тр} = 0,04$  м [5].

Математическое описание статики и динамики непрерывного процесса diazотирования, осуществляемого в турбулентной трубчатой реакторной установке diazотирования, приведено в работах [6–8]. Математическая модель статики непрерывного процесса diazотирования представляет систему нелинейных дифференциальных уравнений в обыкновенных производных для трубчатой части реакторной установки и систему нелинейных алгебраических уравнений для диффузор-конфузорных устройств турбулизации потока реакционной массы. При проведении расчета непрерывного процесса diazотирования концентрация азотистой

кислоты контролируется по длине трубчатой части реактора и на его выходе. В зависимости от этого определяются точки распределенного по длине реактора ввода раствора нитрита натрия в реакторную установку, добываясь при этом гладкого протекания реакции диазотирования –  $c_{AK}^{ВЫХ} \in [7,0; 14,0]$  моль/м<sup>3</sup>.

### Исследование режимов функционирования турбулентной трубчатой реакторной установки диазотирования

Цели исследования:

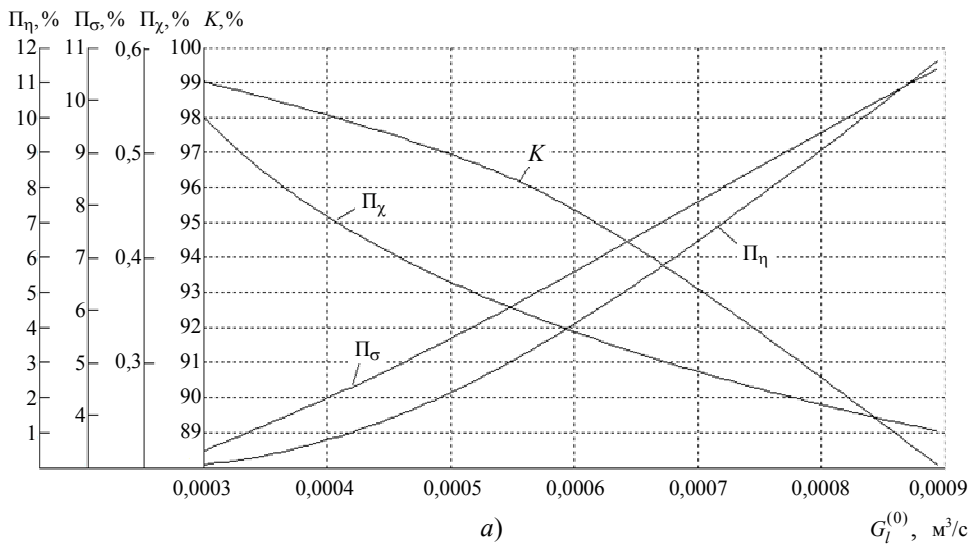
1) анализ статических режимов (характеристик) функционирования реакторной установки;

2) построение областей допустимых режимов работы реакторной установки в пространстве управляющих воздействий: температуры в зонах реакции диазотирования  $T^{(l)}$ ,  $l = 1, 2, \dots$ , распределения подачи нитрита натрия по длине трубчатой реакторной установки диазотирования  $\gamma^{(i)}$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , и изучение перемещения этих областей в зависимости от изменения неопределенных параметров (возмущающих воздействий);

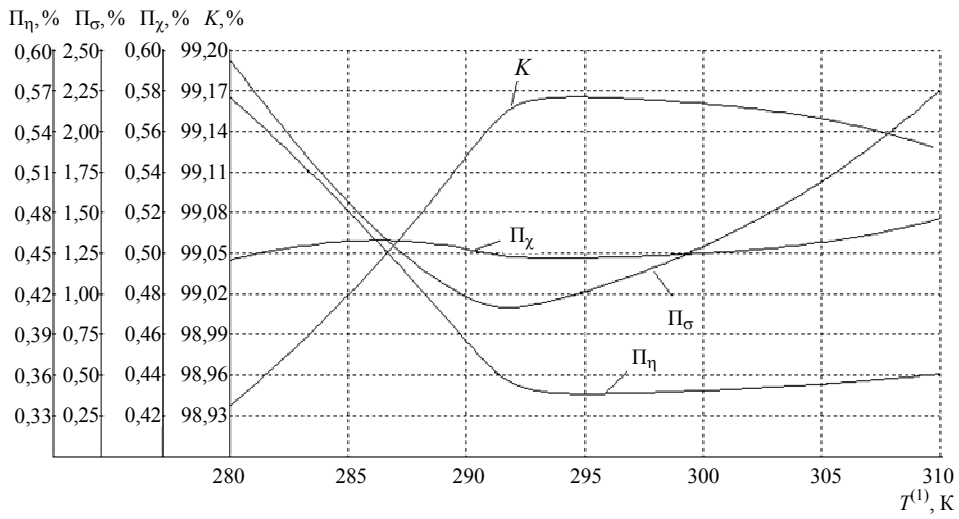
3) построение допустимых режимов работы ХТС в пространстве неопределенных параметров сырья, технологических переменных и коэффициентов математической модели ХТС, в пределах которых обеспечивается заданное регламентом производства (в смысле безопасности, энерго- и ресурсосбережения и качества выпускаемой продукции) функционирование ХТС;

4) определение на основе изучения множества допустимых режимов работы ХТС возможных целевых функций, классов и структур систем управления.

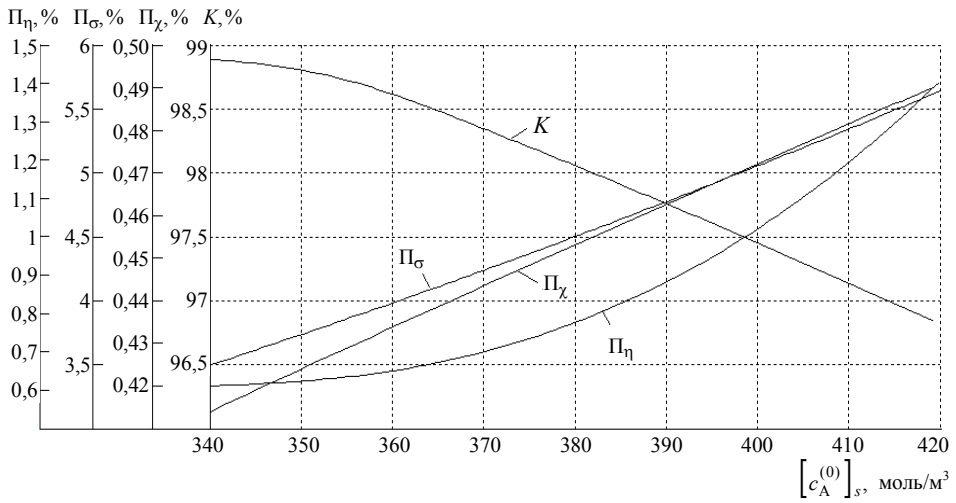
Результаты вычислительных экспериментов по исследованию статических режимов функционирования реакторной установки диазотирования с диффузор-конфузорными устройствами турбулизации потока приведены на рис. 2, а, б.



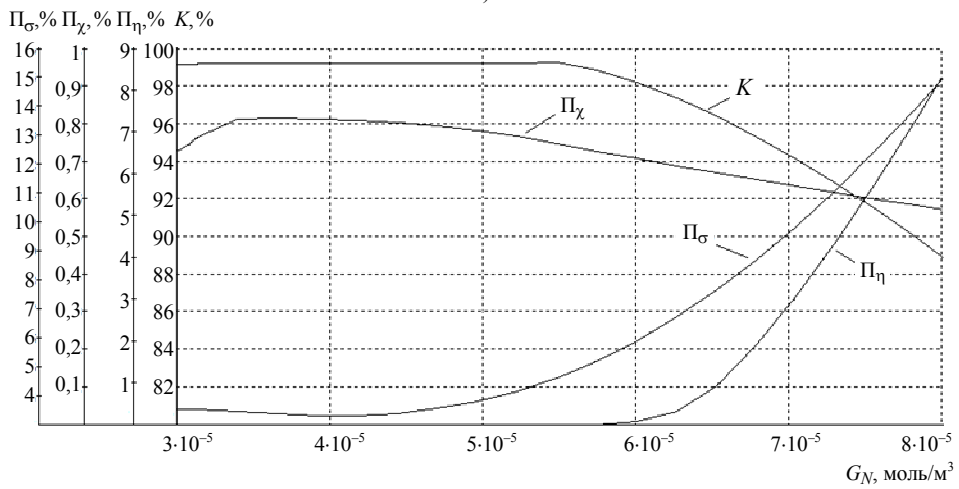
**Рис. 2. Статические характеристики непрерывного процесса диазотирования в зависимости от общего расхода солянокислой суспензии амина (а), температуры солянокислой суспензии амина в питании реакторной установки (б), концентрации твердой фазы амина (в) и общего расхода раствора нитрита натрия (з) (начало)**



б)



б)



в)

Рис. 2. Окончание

Анализ результатов компьютерного моделирования показал, что существуют достаточно узкие пределы изменения допустимых значений, при которых выход диазосоединения  $K$  близок к максимальному значению и выполняются другие условия (ограничения) технологического регламента.

При повышении расхода солянокислой суспензии амина  $G_I$  происходит заметное снижение выхода диазосоединения  $K$  и возрастает проскок амина  $\Pi_\eta$  (см. рис. 2, *а*), что объясняется недостаточным количеством диазотирующего агента в зоне реакции и уменьшением времени пребывания реакционной массы в реакторной установке диазотирования.

Важной режимной переменной процесса диазотирования, оказывающей существенное влияние на скорости растворения твердой фазы амина и химического взаимодействия, является температура в зоне реакции диазотирования  $T_I$  (см. рис. 2, *б*). Анализ графиков изменения выходных переменных процесса диазотирования при варьировании температуры на входе в реактор выявил экстремальный характер статических характеристик. Диапазон допустимых изменений температуры на входе в реактор, при котором выполняются все технологические требования, составляет 290...295 К. За пределами этого диапазона нарушаются условия гладкости протекания реакции по концентрации азотистой кислоты, содержанию нитрозных газов и диазосмол в диазорастворе.

Анализ графиков, представленных на рис. 2, *в*, показывает, что увеличение концентрации твердой фазы амина  $[c_A^{(0)}]_s$  приводит к снижению выхода диазосоединения  $K$  и увеличению проскока амина  $\Pi_\eta$  из-за нехватки соляной кислоты и снижения скорости растворения твердой фазы амина. Одновременно с проскоком возрастает концентрация нитрозных газов, образующихся из непрореагировавшей азотистой кислоты.

При увеличении расхода нитрита натрия  $G_N$  в питании реактора (рис. 2, *з*) увеличивается избыток азотистой кислоты в реакционной зоне, которая быстро разлагается до нитрозных газов  $\Pi_\sigma$ . Кроме того, резко возрастает проскок амина  $\Pi_\eta$  вследствие сокращения времени пребывания реакционной смеси в рабочей зоне реакторной установки.

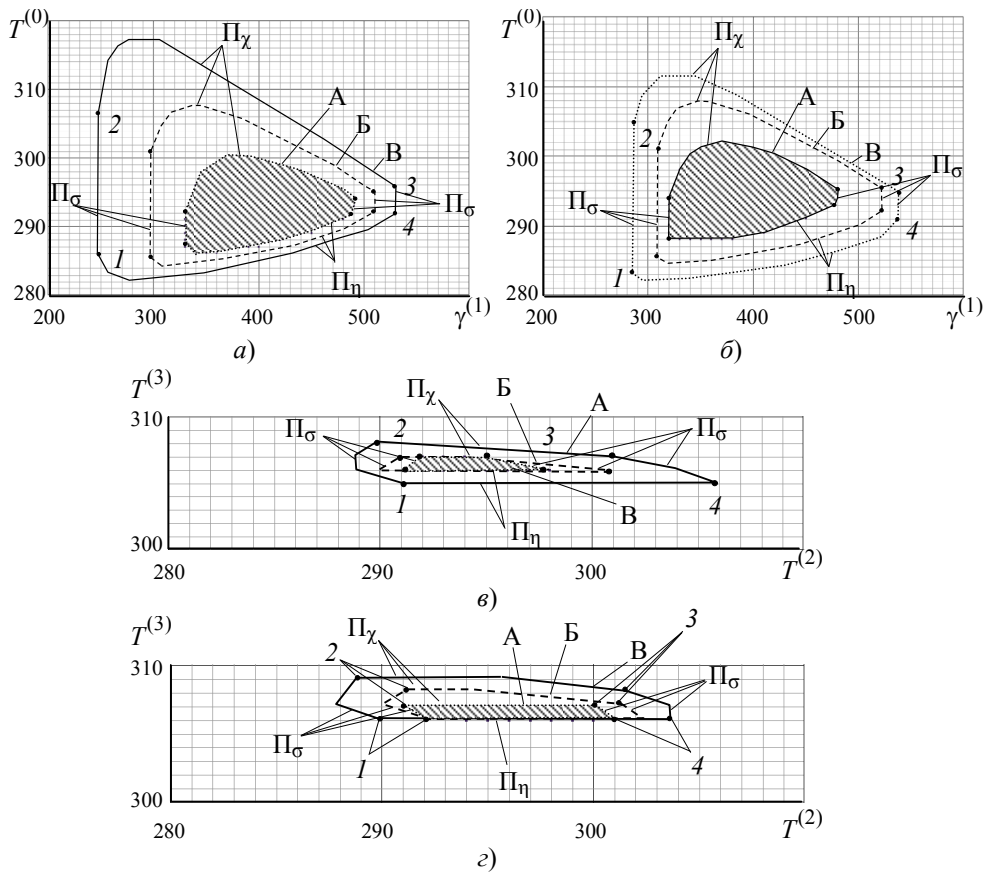
Задачу построения областей допустимых режимов функционирования ХТС сформулируем следующим образом. Для заданного типа  $a$  аппаратного оформления ХТС необходимо определить область допустимых режимов  $\Omega(\mathbf{z}, \xi)$  такую, для которой выполняются регламентные и проектные ограничения для всех возможных значений варьируемых переменных  $\underline{z}_i \leq z_i \leq \overline{z}_i, i = \overline{1, l}, \quad \underline{\xi}_i \leq \xi_i \leq \overline{\xi}_i, i = \overline{1, k}$ .

Построение области  $\Omega(\mathbf{z}, \xi)$  осуществлялось методом сканирования по переменным  $z_i$  при различных значениях неопределенных параметров:  $\xi_i = \underline{\xi}_i, \xi_i = \xi_{\text{ном}}, \xi_i = \overline{\xi}_i, i = \overline{1, k}$ . Номинальные значения и интервалы изменения неопределенных параметров представлены в табл. 1. Области допустимых режимов  $\Omega(\mathbf{z}, \xi)$  приведены на рис. 3, *а – з*.

Анализ графиков и областей допустимых режимов функционирования реакторной установки диазотирования производительностью 1000 т/год позволяет сделать следующие выводы: 1) при случайных отклонениях концентрации твердой фазы амина  $[c_A^{(0)}]_s$  от регламентного значения, кинетического коэффициента  $A$

Номинальные значения и интервалы изменения неопределенных параметров

Неопределенные параметры	Номинальное (среднее) значение	Интервал изменения
Концентрация твердой фазы амина $[c_A^{(0)}]_s$ , моль/м <sup>3</sup>	360	340...380
Кинетический коэффициент растворения твердой фазы амина $A$	$5,5 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^5 \dots 6,0 \cdot 10^5$
Энергии активации разложения азотистой кислоты и образования диазосмол, Дж/моль:		
$E_{03}$	87150	86539,95...87760,05
$E_{04}$	119650	119410,7...119889,3
$E_{05}$	63690	63053,1...63053,1



**Рис. 3. Области  $\Omega(z, \xi)$  допустимых режимов функционирования реакторной установки диазотирования в различных координатах:**

$a, в$  – при различных концентрациях твердой фазы амина:  $[c_A^{(0)}]_s = 340$  моль/м<sup>3</sup> (область А),

$[c_A^{(0)}]_s^{\text{НОМ}} = 360$  моль/м<sup>3</sup> (область Б),  $[c_A^{(0)}]_s = 380$  моль/м<sup>3</sup> (область В);  $б, г$  – при различных значениях кинетического коэффициента растворения:  $\underline{A} = 5,0 \cdot 10^5$  (область А),

$A^{\text{НОМ}} = 5,5 \cdot 10^5$  (область Б),  $\overline{A} = 6,0 \cdot 10^5$  (область В)



в уравнении растворения, энергии активации разложения азотистой кислоты  $E_{03}$  и энергий активации образования диазосмол  $E_{04}$ ,  $E_{05}$  от номинальных значений выход диазосоединения снижается и нарушаются требования технологического регламента (ограничения); 2) для управления процессом диазотирования целесообразно использовать распределение подачи раствора нитрита натрия  $\gamma^{(i)}$ ,  $i = 1, 2, \dots$  по длине реактора и поддержание температурного профиля  $T_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$  по длине трубчатой части реактора; 3) при изменении неопределенных параметров в заданных пределах существуют допустимые области изменения управляющих переменных и имеет место пересечение этих областей (заштрихованная область), что подтверждает возможность и целесообразность постановки задачи оптимизации реакторных установок диазотирования в условиях неопределенности.

### Задача оптимизации при исследовании процесса тонкого органического синтеза

Сформулируем задачу оптимизации конструктивных и режимных переменных турбулентной трубчатой реакторной установки диазотирования комбинированного типа с жесткими ограничениями: при фиксированных значениях числа вертикальных труб  $\hat{a}_1$ , диаметра  $\hat{d}_{тр}$  и высоты  $\hat{l}_{тр}$  трубы в секции турбулентного реактора требуется определить конструктивные переменные  $d^*$  (общую длину  $L^*$  трубчатой части (число секций  $N^*$  реактора), объем  $V_{д-к}$  диффузор-конфузора (камеры смешения)) и режимные переменные  $z^*$  (распределение температуры  $T^{(i)*}$  и подачи нитрита натрия  $\gamma^{(i)}$  по секциям  $i = 1, 2, \dots$  (длине трубчатой части)) реакторной установки такие, чтобы критерий оптимизации (выход диазосоединения  $C(\cdot) = K$  или приведенные затраты  $C(\cdot) = ПЗ$  на производство 1 т пигмента) достигал минимального значения, то есть

$$C^*(d, z) = \min_{d, z} \{C(d, z)\} \quad (1)$$

при связях в форме уравнений математической модели статики процесса диазотирования [6], а также при избыточном содержании нитрита натрия в реакционной зоне  $Izb \leq 5\%$ ; и ограничениях

$$g_j(d, z) \leq 0, \quad j = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где  $m = 7$ ;  $g_1 = 1000,0 - Q(\hat{a}, d, z, \xi)$ ;  $g_2 = 7,0 \text{ моль/м}^3 - c_{AK}^{ВЫХ}(\hat{a}, d, z, \xi)$ ;  $g_3 = c_{AK}^{ВЫХ}(\hat{a}, d, z, \xi) - 14,0 \text{ моль/м}^3$ ;  $g_4 = 98,0\% - K_D(\hat{a}, d, z, \xi)$ ;  $g_5 = \Pi_\chi(\hat{a}, d, z, \xi) - 0,5\%$ ;  $g_6 = \Pi_\sigma(\hat{a}, d, z, \xi) - 1,0\%$ ;  $g_7 = \Pi_\eta(\hat{a}, d, z, \xi) - 0,5\%$ .

Решение задачи нелинейного программирования (1), (2) находили методом последовательного квадратичного программирования с использованием программы ROPUD, разработанной сотрудниками лаборатории математического моделирования НИФХИ им. Л.Я. Карпова (г. Москва) под руководством доктора технических наук, профессора Г.М. Островского. Результаты решения представлены в табл. 2.

Сравнительный анализ данных табл. 2 показывает, что оптимальные значения конструктивных параметров изменяются в зависимости от постановки задачи

Таблица 2

**Результаты решения задачи оптимизации реакторной установки  
диазотирования при  $\xi_1 = [c_A^{(0)}]_s = 360$  моль/м<sup>3</sup>**

Наименование переменных задачи	Значение переменных для задачи оптимизации	
	по выходу диазосоединения $K$ , %	по приведенным затратам $C$ , у.е./т
1	2	3
<b>Конструктивные переменные</b>		
Число секций реактора $N$ , шт.	7	6
Число вертикальных труб $a_1$ , шт.	10	
Число диффузор-конфузоров (камер смешения) в одной секции $a_2$ , шт.	1	
Диаметр трубы $d_{тр}$ , м	0,04	
Высота трубы $h_{тр}$ , м	1,8	
Объем диффузор-конфузора $V_{д-к}$ , м <sup>3</sup>	20,0·10 <sup>-3</sup>	
<b>Режимные переменные</b>		
Распределение температуры по зо- нам реактора, $T^{(i)}$ , $i = \overline{1, 3}$ , К	290	289,7
	297	295,6
	308	305,3
Распределение подачи раствора нитрита натрия по зонам реактора $\gamma^{(i)}$ , $i = \overline{1, 3}$ , %	46,8	37,4
	36,3	39,2
	16,9	23,4
Концентрация нитрита натрия $c_N^{(0)}$ , моль/м <sup>3</sup>	1460,0	
Расход соляно-кислой суспензии амин $G_I^{(0)}$ , м <sup>3</sup> /с	4,2·10 <sup>-4</sup>	
Расход нитрита натрия $G_N^{(0)}$ , м <sup>3</sup> /с	1·10 <sup>-4</sup>	
<b>Параметры неопределенности</b>		
Концентрация твердой фазы амина $[c_A^{(0)}]_s$ , моль/м <sup>3</sup>	360	
Кинетический коэффициент раство- рения твердой фазы амина	5,5·10 <sup>5</sup>	

1	2	3
<b>Критерий оптимизации</b>		
Выход диазосоединения $K$ , %	99,4	99
Приведенные затраты $C$ , у.е./т	3287,2	3106,5
<b>Значения функций-ограничений</b>		
Производительность реакторной установки $Q$ , т/год	1014	1011
Содержание диазосмол в диазорастворе $P_x$ , %	0,5	0,4
Содержание нитрозных газов в диазорастворе $P_\sigma$ , %	0,95	0,9
Проскок амина $P_\eta$ , %	0,08	0,5
Избыток $I_{zb}$ , %	3,7	3,2
Концентрация азотистой кислоты на выходе из реактора $c_{AK}$ , моль/м <sup>3</sup>	7,5	7,3

оптимизации: для обеспечения максимального значения выхода целевого продукта  $K = 99,4$  % необходимо наращивать длину трубчатой части реакторной установки до  $l = 126$  м, в то время как достижение минимального значения приведенных затрат ПЗ = 3106,5 у.е./т обеспечивает длина трубчатой части реакторной установки  $l = 108$  м. При этом выход диазосоединения составляет 99 %.

#### Список литературы

1. Стратегия развития химической и нефтехимической промышленности России на период до 2015 года [Электронный ресурс] : утв. приказом Минпромэнерго России от 14 марта 2008 г. № 119 // Минпромторг России : офиц. сайт. – Режим доступа : <http://www.minpromtorg.gov.ru/ministry/strategic/sectoral/6>. – Загл. с экрана.
2. Исследование процессов растворения и диазотирования 3-нитро-4-аминотолуола (азоамин красный А) в концентрированных кислотах и разложения 3-нитро-4-диазотолуола в широком диапазоне рН : отчет о НИР / Тамб. фил. Моск. науч.-произв. об-ния орган. полупродуктов и красителей ; Я.Э. Брюске. – Тамбов, 1976. – № ГР. 72059965. – Инв. № 42910.
3. Макрокинетика процесса растворения 3-нитро-4-аминотолуола / Б.А. Баранов [и др.] // Кинетика и катализ. – 1984. – Т. 25, № 6. – С. 1457–1461.
4. Бодров, В.И. Математическое моделирование процесса получения азокрасителей / В.И. Бодров, С.И. Дворецкий, А.М. Кудрявцев // Изв. высш. учеб. заведений. Химия и хим. технология. – 1985. – Т. 28, № 1. – С. 81–86.
5. Карнишев, В.В. Разработка энерго- и ресурсосберегающих технологических установок непрерывного действия / В.В. Карнишев, С.И. Дворецкий // Хим. и нефтегазовое оборудование. – 1998. – № 4. – С. 47.

6. Дворецкий, Д.С. Компьютерное моделирование турбулентных реакторных установок тонкого органического синтеза в условиях неопределенности / Д.С. Дворецкий, С.И. Дворецкий, Е.В. Пешкова // Изв. высш. учеб. заведений. Химия и хим. технология. – 2007. – Т. 50, вып. 8. – С. 70–75.

7. Дворецкий, С.И. Математическое моделирование и исследование процесса синтеза азокрасителей в турбулентном трубчатом реакторе / С.И. Дворецкий, В.В. Карнишев // Изв. высш. учеб. заведений. Химия и хим. технология. – 1999. – Т. 42, вып. 3. – С. 101–105.

8. Оптимизация и аппаратурно-технологическое оформление непрерывных процессов тонкого органического синтеза в производстве органических полупродуктов и красителей / Д.С. Дворецкий [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 75–89.

---

## Study of Systemic Links, Regularities of Functioning and Flexibility of Energy and Resource-Saving Chemical Technological Systems of Fine Organic Synthesis

S.I. Dvoretzky, S.G. Tolstykh, E.V. Peshkova

*Department "Technology of Food Products", TSTU;  
topt@topt.tstu.ru*

**Key words and phrases:** diazotization; energy and resource-saving chemical technological systems; kinetics; mathematical modeling; optimization; production of azo pigments; structure and mode variables; systems analysis; turbulent tube reactor; uncertain parameters.

**Abstract:** The paper discusses an approach to the analysis of systemic linkages and regularities of functioning and development of energy and resource-saving chemical technological systems in conditions of partial uncertainty. The proposed approach is implemented on the example of diazotization process carried out in a turbulent tubular reactor. A study of static modes of operation of tubular reactor and permissible modes under the influence of disturbances (uncertain parameters) has been made. The problem of optimizing the design and mode variables of diazotization in tubular type reactor has been formulated and solved.

---

## Untersuchung der Systemverbindungen, der Gesetzmäßigkeiten der Funktionierung und der Flexibilität der energie- und ressourcensparanden chemietechnologischen Systeme der dünnen organischen Synthese

**Zusammenfassung:** Es ist das Herangehen zur Analyse der Systemverbindungen und der Gesetzmäßigkeiten der Funktionierung und der Entwicklung der energie- und ressourcensparanden chemietechnologischen Systeme in den Bedingungen der Teilunbestimmtheit betrachtet. Das vorschlagenden Herangehen ist am Beispiel des Prozesses des Diasotierens im turbulenten Rohrreaktor verwirklicht. Es ist die Untersuchung der statischen Regime der Funktionierung der Rohrreaktoranlage und der Gebiete der zulässigen Regime bei dem Einfluss der störenden Einwirkungen (der unbestimmten Parameter) durchgeführt. Es sind die Aufgaben der Optimierung der Konstruktiv- und Regimevariablen der Reaktoranlage der Diasotierung des Rohrtypus formuliert und gelöst.

## **Etude des liens systémiques, des régularités du fonctionnement et de la fiabilité des systèmes chimiques et technologiques énergétiques et économisant des ressources de la synthèse fine et organique**

**Résumé:** Est examinée l'approche pour l'analyse des liens systémiques, des régularités du fonctionnement et de la fiabilité des systèmes chimiques et technologiques énergétiques et économisant des ressources dans les conditions de l'indétermination partielle. L'approche proposée est réalisée à l'exemple du processus de la diazotation réalisé dans un réacteur turbulent à tubes. Est effectuée l'étude des régimes statiques du fonctionnement de l'installation tubulaire de réaction et des domaines des régimes admis lors des actions perturbatrices (des paramètres indéterminés). Sont formulés et résolus les problèmes de l'optimisation des variables constructives et de régime de l'installation de réaction de la diazotation du type tubulaire.

---

**Авторы:** *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии продовольственных продуктов», и.о. ректора; *Толстых Светлана Германовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии продовольственных продуктов»; *Пешкова Евгения Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии продовольственных продуктов», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ», заместитель генерального директора ОАО «Корпорация «Росхимзащита», г. Тамбов.

---