

УДК 66.011

**АНАЛИЗ ГИБКОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
ПРОЕКТИРУЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

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

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

**Ключевые слова и фразы:** допустимая область изменения неопределенных параметров; индекс гибкости; область неопределенности; работоспособность (гибкость) технических систем; системный анализ; технические системы.

**Аннотация:** Сформулированы две задачи исследования работоспособности (гибкости) технических систем (технологических машин, аппаратов и систем): А – оценка работоспособности системы для априори заданной области неопределенности; Б – количественная оценка индекса гибкости системы и определение его максимального значения. Приведен пример исследования гибкости, индекса гибкости и двухкритериальной оптимизации для турбулентного трубчатого реактора тонкого органического синтеза.

**Обозначения**

$A$ – кинетический коэффициент растворения твердой фазы амина;	$\Pi$ – количество вещества в продуктах реакции диазотирования;
$C(-)$ – целевая функция оптимизации;	$\Pi_{\eta}$ – проскок амина, %;
$c$ – концентрация, моль/м <sup>3</sup> ;	$\Pi_{\chi}$ – количество диазосмол, %;
$E$ – энергия активации, Дж/моль;	$\Pi_{\sigma}$ – количество нитрозных газов, %;
$G$ – расход, м <sup>3</sup> /с;	$\Omega$ – область допустимых режимов функционирования химико-технологической системы.
$Izb$ – избыток нитрита натрия в реакционной зоне;	
$K$ – выход диазосоединения, %;	
$n$ – порядок реакции;	
$Q$ – производительность реакторной установки, т/год;	
$T$ – температура, К;	
$\gamma^{(i)}$ – распределение нитрита натрия, $i = 1, 2, 3, \dots$ , %;	
$\delta_{\max}$ – индекс гибкости;	
$\Xi$ – область неопределенности;	
$\xi$ – вектор неопределенных параметров;	

**Индексы**

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

**Введение**

Гибкость проектируемой химико-технологической системы (**ХТС**) является важнейшим компонентом ее работоспособности и характеризует способность этой системы иметь допустимую рабочую точку (режим) функционирования для всей области неопределенности  $\Xi$ , имеющей место в процессе эксплуатации ХТС.

Понятно, что и другие компоненты работоспособности, такие как управляемость, надежность, безопасность и др. в равной степени важны. Тем не менее исследование гибкости проектируемой ХТС – это первый шаг, который должен быть сделан для оценки работоспособности проекта и оптимизации конструктивных и режимных переменных ХТС.

Можно сформулировать две задачи, связанные с анализом гибкости проектируемой ХТС: А – оценка работоспособности ХТС для априори заданной области неопределенности; Б – количественная оценка индекса гибкости проекта ХТС и определение максимального значения индекса гибкости проекта.

### Постановка задачи исследования гибкости проектируемой ХТС

Задача анализа работоспособности проектируемой ХТС, определяемой вектором проектных параметров  $a$  и  $d$ , формулируется следующим образом: требуется определить вектор режимных (управляющих) переменных  $z$ , обеспечивающий выполнение ограничений (требований по спецификации качества выпускаемой продукции, производительности ХТС, безопасности производства и др.),

$$g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, j \in J \quad (1)$$

для  $\forall \xi$  из области неопределенности  $\Xi$ , где  $\xi$  – вектор неопределенных параметров ХТС, принимающий любые значения из некоторой априори заданной области  $\Xi$ ;  $g(\cdot)$  – вектор функций-ограничений.

Вектор  $a$  проектных параметров ассоциируется со структурой ХТС и типом технологического оборудования, входящего в его состав, а вектор  $d$  – с размерами оборудования. Эти переменные, как правило, считаются неизменными, когда проект реализован, и не изменяются в процессе функционирования ХТС. Однако для блочно-модульных ХТС, обладающих возможностью наращивания технического ресурса ХТС за счет подключения унифицированных модулей, вполне возможно изменение вектора  $d$  на этапе функционирования ХТС. В этом случае изменяемая часть вектора  $d$  наряду с вектором управляющих переменных  $z$  может выполнять роль управляющих переменных, и таким образом число степеней свободы для обеспечения выполнения ограничений на этапе функционирования блочно-модульных ХТС увеличивается.

Вектор  $z$  ассоциируется с режимными переменными функционирования ХТС или управляющими переменными (например, оптимальными заданиями регуляторам системы автоматического управления ХТС), которыми можно манипулировать в процессе функционирования ХТС таким образом, чтобы, во-первых, обеспечить выполнение требований технического задания (ТЗ) на проектирование и работоспособность ХТС, и, во-вторых, минимизировать эксплуатационные затраты.

Введем некоторую функцию выполнимости ограничений (1) –  $\eta(a, d, \xi)$ , зависящую от векторов конструктивных параметров и неопределенных переменных  $\xi$ :

$$\eta(a, d, \xi) = \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi). \quad (2)$$

Если  $\eta(a, d, \xi) \leq 0$ , то проектируемая ХТС, описываемая векторами  $a$  и  $d$ , работоспособна при фиксированном  $\xi$ ; в противном случае (при  $\eta(a, d, \xi) > 0$ ) – неработоспособна. При  $\eta(a, d, \xi) = 0$  хотя бы для одного номера  $j \in J$  проектируемая ХТС находится на границе допустимой области функционирования.

Переформулируем задачу (2) в форме стандартной задачи нелинейного программирования. Определим скалярную величину  $\alpha$  такую, что

$$\eta(a, d, \xi) = \min_{z, a} \alpha \quad (3)$$

при ограничениях

$$g_j(a, d, z, \xi) \leq \alpha, \quad j \in J. \quad (4)$$

Для анализа работоспособности проектируемой ХТС необходимо убедиться в том, что  $\eta(a, d, \xi) \leq 0$  для  $\forall \xi$  из некоторой априори заданной области неопределенности  $\Xi$ . Постановка задачи А имеет вид

$$\chi(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \eta(a, d, \xi), \quad (A)$$

где  $\chi(a, d)$  – функция гибкости проекта ХТС с векторами  $a$  и  $d$ .

Анализ знака функции гибкости  $\chi(a, d) \leq 0$  или  $\chi(a, d) > 0$  позволяет сделать заключение о допустимом функционировании ХТС для всей области  $\Xi$  возможных изменений вектора неопределенных параметров  $\xi$  или о недопустимом функционировании ХТС для некоторой подобласти  $\Xi$ .

### Постановка задачи определения индекса гибкости ХТС

Введем количественную оценку гибкости проекта ХТС, определяемого векторами конструктивных параметров  $a$  и  $d$ . Для этого запишем область изменения неопределенных параметров в виде

$$\Xi(\delta) = \left\{ \xi \mid \xi^N - \delta \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + \delta \Delta \xi^+ \right\},$$

где  $\delta$  – неотрицательная скалярная переменная: при  $\delta = 1$  имеем  $\Xi(1) = \Xi$ ; при  $\delta < 1$  –  $\Xi(\delta) \subset \Xi$ ; при  $\delta > 1$  –  $\Xi \subset \Xi(\delta)$ .

Индексом гибкости  $\delta_{\max}$  будет являться наибольшее значение  $\delta$ , для которого выполняются ограничения (4) для всей области  $\Xi(\delta_{\max})$ .

Сформулируем математическую постановку задачи Б определения индекса гибкости  $\delta_{\max}$  проектируемой ХТС, описываемой векторами проектных параметров  $a$  и  $d$ :

$$\delta_{\max} = \max \delta \quad (B)$$

при ограничениях

$$\chi(a, d) = \max_{\xi \in \Xi(\delta)} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0,$$

$$\Xi(\delta) = \left\{ \xi \mid \xi^N - \delta \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + \delta \Delta \xi^+ \right\},$$

$$\Xi(\delta_{\max}) = \left\{ \xi \mid \xi^N - \delta_{\max} \Delta \xi^- \leq \xi \leq \xi^N + \delta_{\max} \Delta \xi^+ \right\}.$$

Значения неопределенных параметров  $\xi^c \in \Xi(\delta_{\max})$ , соответствующее решению задачи (Б) при  $\chi(a, d) = 0$ , называются критическими точками.

Как правило, критические точки  $\xi^c$  соответствуют отдельным вершинам многогранника  $\Xi(\delta_{\max})$ , и решение задач (А) и (Б) может быть значительно упрощено. Рассмотрим задачу анализа гибкости проекта ХТС в предположении, что  $\xi^k, k \in K$ , представляют вершины многогранника  $\Xi$ . В этом случае можно запи-

сать, что  $\chi(a, d) = \max_{k \in K} \eta(a, d, \xi^k)$ , где  $\eta(a, d, \xi^k)$  находится из решения задачи оптимизации (3).

Заметим, что в задаче (Б) величина  $\chi(a, d)$  достигает нулевого значения в точке оптимального решения, поскольку критическая точка всегда будет находиться на границе допустимой области функционирования ХТС. Пусть  $\Delta \xi^k, k \in K$ , обозначает направление от номинальной точки  $\xi^N$  до  $k$ -й вершины многогранника  $\Xi$ . Тогда максимальное отклонение  $\delta^k$  от границы вдоль  $\Delta \xi^k$  получим из решения следующей экстремальной задачи:  $\delta^k = \max_{z, \delta} \delta, k \in K$ , при ограничениях:

$$g(a, d, z, \xi^k) \leq 0, j \in J;$$

$$\xi^k = \xi^N \pm \delta \Delta \xi^k.$$

Анализ полученных прямоугольных областей изменения  $\xi$  показывает, что только наименьший прямоугольник может быть вписан в допустимую область, который определяет индекс гибкости

$$\delta_{\max} = \min_{k \in K} \{\delta^k\}.$$

Следует заметить, что только при условии выпуклости функций  $g_j(\cdot)$  по переменным  $z$  и критические точки  $\xi^c$  будут соответствовать вершинам многогранника  $\Xi$ . Это условие существенно ограничивает применение рассмотренных выше постановок задач анализа гибкости (А) и определение индекса гибкости (Б) при проектировании ХТС, поскольку возникают определенные трудности в проверке условий выпуклости функций ограничений (4).

### **Исследование гибкости и вычисление индекса гибкости проектируемой ХТС**

Рассмотрим методику исследования гибкости и вычисления индекса гибкости на примере непрерывного процесса diazotirovaniya ароматических аминов нитритами щелочных металлов, осуществляемого в турбулентном трубчатом реакторе с диффузор-конфузорными устройствами турбулизации потока реакционной массы [1]. Математическая модель статистики непрерывного процесса diazotirovaniya 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 [2, 3].

Регламентные и проектные ограничения задачи включают:

– производительность  $Q$  реакторной установки diazotirovaniya должна составлять 1000 т пигмента в год:

$$g_1(a, d, z) = 1000 - Q \leq 0; \tag{5}$$

– выход  $K$  diazosoyedineniya должен составлять не менее 98 %:

$$g_2(a, d, z) = 98 - K \leq 0; \tag{6}$$

– проскок  $\Pi_\eta$  амина не должен превышать 0,5 %:

$$g_3(a, d, z) = \Pi_\eta - 0,5 \leq 0; \tag{7}$$

– содержание диазосмол  $\Pi_\chi$  на выходе из реакторной установки диазотирования не должно превышать 0,5 %:

$$g_4(a, d, z) = \Pi_\chi - 0,5 \leq 0; \quad (8)$$

– содержание нитрозных газов  $\Pi_\sigma$  на выходе из реактора не должно превышать 1 %:

$$g_5(a, d, z) = \Pi_\sigma - 1,0 \leq 0; \quad (9)$$

– концентрация азотистой кислоты  $c_{AK}$  в диазорастворе на выходе из реакторной установки должна находиться в диапазоне  $7 \text{ моль/м}^3 \leq c_{AK} \leq 14 \text{ моль/м}^3$ :

$$g_6(a, d, z) = 7,0 - c_{AK} \leq 0, \quad g_7(a, d, z) = c_{AK} - 14 \leq 0. \quad (10)$$

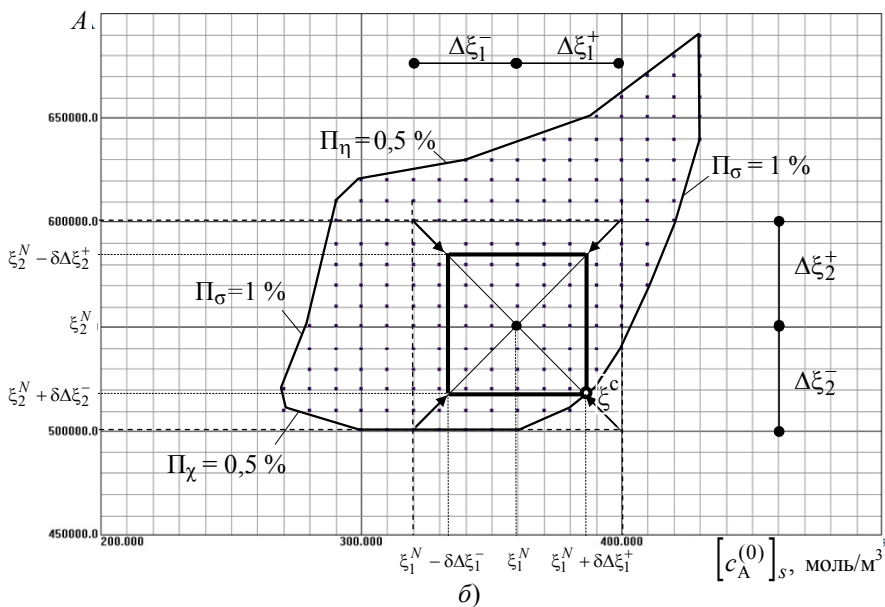
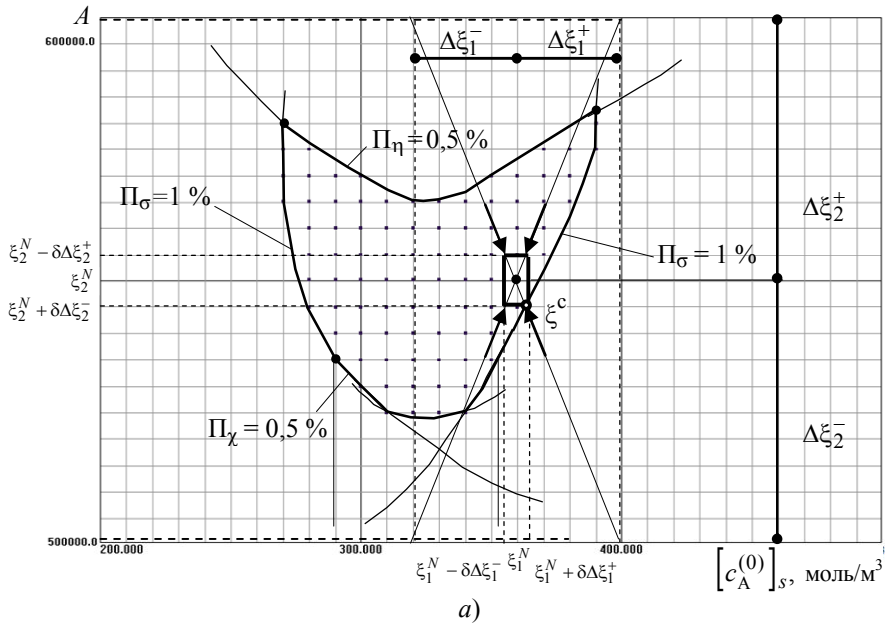
Конструктивные и режимные переменные реакторной установки диазотирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

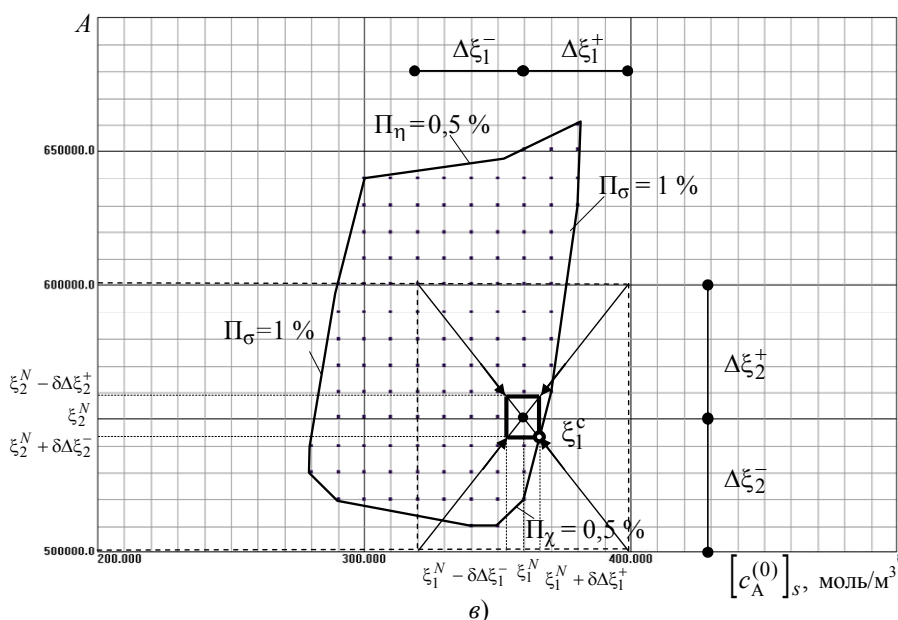
**Конструктивные и режимные переменные  
реакторной установки диазотирования**

Наименование переменных задачи	Значение переменных			
<b>Конструктивные переменные</b>				
Число секций реактора $N$ , шт.	7			
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>				
Режим	1	2	3	4
Распределение температуры по зонам реактора $T^{(i)}$ , $i = \overline{1, 3}$ , К	290 297 308	289,7 295,6 305,3	288 294 315	289,8 290,1 312
Распределение подачи раствора нитрита натрия по зонам реактора $\gamma^{(i)}$ , $i = \overline{1, 3}$ , %	46,8 36,3 16,9	37,4 39,2 23,4	47,6 38,1 14,2	47,7 39,1 13,1
Выход диазосоединения $K$ , %	99,4	99,4	99,3	99,1
Концентрация нитрита натрия $c_N^{(0)}$ , моль/м <sup>3</sup>	1460,0			
Расход соляно-кислой суспензии амина $G_I^{(0)}$ , 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			
Кинетическая константа для реакции растворения ароматического амина $A$	5,5·10 <sup>5</sup>			

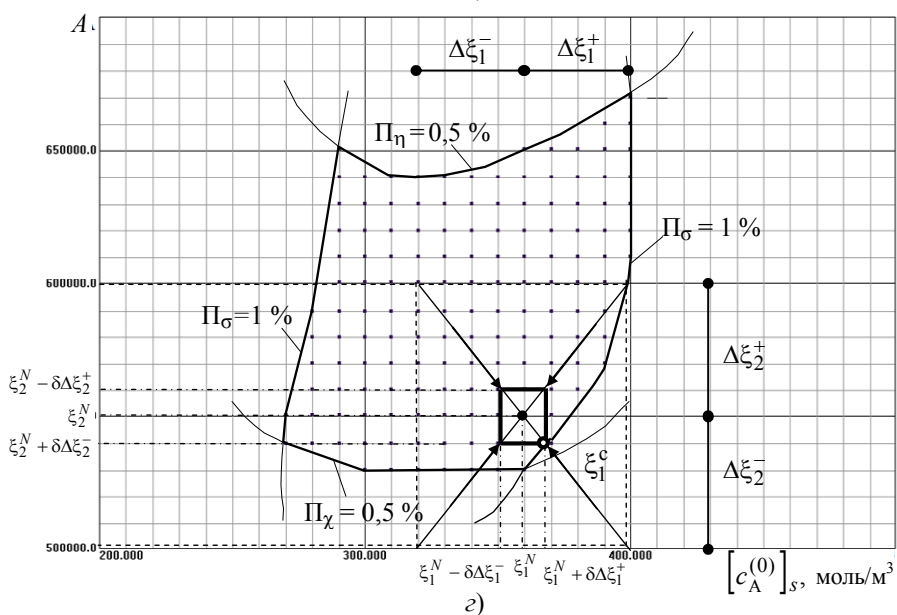
На рисунке 1 изображена область допустимых режимов функционирования реакторной установки диазотирования в области неопределенных параметров «Концентрация твердой фазы амина  $[c_A^{(0)}]_s$ » – «Кинетический параметр  $A$  растворения твердой фазы амина». Из анализа формы области допустимых режимов видно, что все функции-ограничения (4) являются выпуклыми за исключением функции-ограничения  $\Pi_\eta \leq 0,5\%$ .



**Рис. 1. Область допустимых режимов функционирования реакторной установки диазотирования в области неопределенных параметров «Концентрация твердой фазы амина» – «Кинетический параметр растворения твердой фазы амина» (начало): а – режим 1; б – режим 2**



б)



в)

**Рис. 1. Окончание:**

б – режим 3; в – режим 4

Анализ полученных прямоугольных областей изменения  $\xi$  показывает, что только наименьший прямоугольник может быть вписан в допустимую область, который определяет индекс гибкости.

Вписывая наименьший прямоугольник относительно номинальной точки  $\xi^N = (360; 5,5 \cdot 10^5)$  в допустимую область, определим индекс гибкости реакторной установки диазотирования, который будет различаться для разных режимов, и, соответственно, для режима 1 примет значение равным  $\delta_{\max} = 0,125$ ; для режима 2 –  $\delta_{\max} = 0,675$ ; для режима 3 –  $\delta_{\max} = 0,175$ ; для режима 4 –  $\delta_{\max} = 0,225$ .

Совокупность критических точек  $\{\xi^c\}$  включает точку  $\xi_1^c$ , в которой функция гибкости  $\chi(a, d)$  реакторной установки диазотирования с векторами режимных и конструктивных переменных (см. табл. 1) обращается в ноль, то есть  $\chi(a, d) = 0$ .

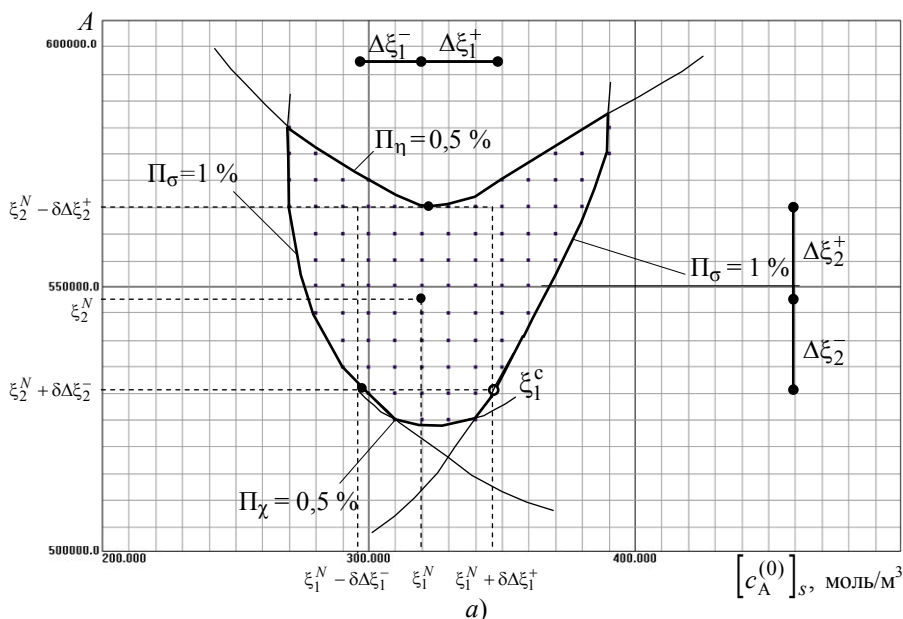
Чем больше индекс гибкости, тем больше область допустимых изменений неопределенных параметров; для проектируемой ХТС наибольшее значение индекса гибкости принимает при реализации режима 2.

Исследование гибкости проектируемой ХТС позволяет сформулировать ТЗ на точность определения неопределенных параметров. Желательно иметь коэффициенты математической модели и технологические переменные, известные с высокой точностью. Но это может неоправданно потребовать огромных затрат. Поэтому целесообразнее вычислить индекс гибкости для проектируемой системы (наименьший прямоугольник относительно номинальной точки), и тогда можно гарантированно рекомендовать работоспособность проектируемой ХТС для всей области неопределенности  $\Xi$ .

Анализируя области допустимых режимов функционирования и соответствующие номинальной точке индексы гибкости для различных режимов, становится очевидным, что для каждого режима возможно назначить альтернативную (специфическую для данного режима) номинальную точку, для которой область допустимых изменений неопределенных параметров будет шире (рис. 2). Назначение альтернативных номинальных точек для параметров неопределенности и расширение областей допустимых изменений неопределенных параметров позволит снизить затраты на уточнение значений неопределенных параметров.

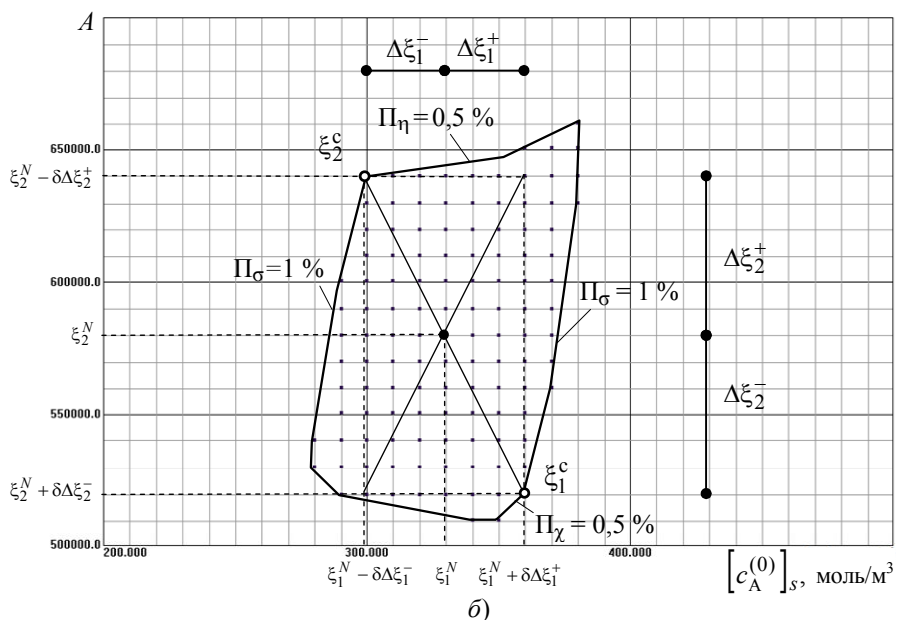
Расчет выходных переменных в альтернативных номинальных точках для режимов 1, 3, 4 (табл. 2) показал что выход диазосоединения существенно не отличается, при этом для режима 1 принимает несколько большее значение.

Недостатком такого подхода является необходимость назначать номинальный вектор неопределенных параметров функционирования ХТС и идентифицировать допустимые области изменения неопределенных параметров  $\Xi$  для каждого конкретного режима функционирования.

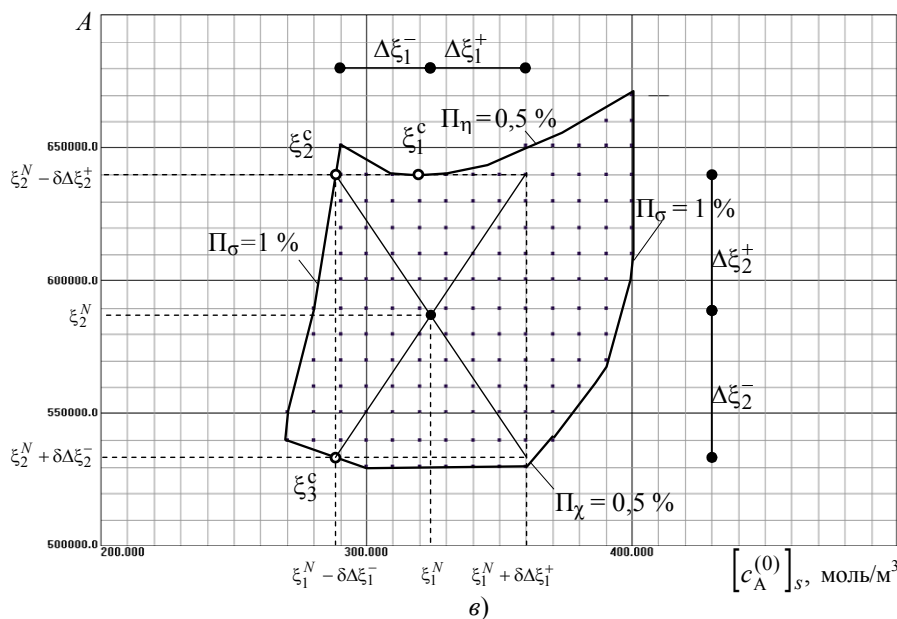


**Рис. 2. Назначение новых номинальных точек параметров неопределенности и увеличение областей допустимых изменений неопределенных параметров (начало):**  
*a* – режим 1





б)



в)

**Рис. 2. Окончание:**  
б – режим 3; в – режим 4

Таблица 2

**Значение выхода диазосоединения для альтернативных номинальных точек параметров неопределенности различных режимов**

Номер режима	Концентрация твердой фазы амина $[c_A^{(0)}]_s$ , моль/м <sup>3</sup>	Кинетическая константа для реакции растворения ароматического амина А	Выход диазосоединения, К, %
1	320	$5,45 \cdot 10^5$	99,5
3	330	$5,80 \cdot 10^5$	99,3
4	327	$5,85 \cdot 10^5$	99,3

## Оптимизация конструктивных и режимных переменных реакторной установки тонкого органического синтеза

Сформулируем двухкритериальную задачу оптимизации. В качестве составляющих критерия оптимизации будем использовать выход диазосоединения  $K$  и капитальные затраты (**КЗ**) на создание реакторной установки диазотирования. При фиксированных значениях числа вертикальных труб  $\hat{a}$ , диаметра  $\hat{d}_{\text{тр}}$  и высоты  $\hat{l}_{\text{тр}}$  трубы требуется определить конструктивные переменные  $d^*$  (общую длину  $L^*$  трубчатой части (число секций  $N^*$  реактора), объем диффузор-конфузора) и режимные  $z^*$  переменные (распределение температуры  $T^{(i)*}$  и подачи нитрита натрия  $\gamma^{(i)}$  по секциям  $i = 1, 2, \dots$  (длине трубчатой части)) реакторной установки такие, что

$$C^*(d, z) = \underset{d, z}{\text{extr}}(K, \text{КЗ}) \quad (11)$$

при связях в форме уравнений математической модели статики процесса диазотирования и ограничениях (5) – (10).

Для решения двухкритериальной задачи (11) с ограничениями (5) – (10) применяли следующий алгоритм.

**Шаг 1.** Формирование допустимой области  $D$ .

Заполнение параллелепипеда

$$\begin{aligned} \underline{d}_i \leq d_i \leq \overline{d}_i, \quad i = \overline{1, n}; \\ \underline{z}_j \leq z_j \leq \overline{z}_j, \quad j = \overline{1, m}; \end{aligned} \quad (12)$$

осуществляется путем генерирования точек  $\text{LP}_\tau$ -последовательности по формуле

$$x_i^{(k)} = \underline{x}_i^{(k)} + \xi(i, k)(\overline{x}_i - \underline{x}_i), \quad i = \overline{1, n+m}, \quad k = \overline{1, N},$$

где  $k$  – номер точки в последовательности;  $i$  – номер координаты  $k$ -й точки;

$$\xi(i, j) = \sum_{k=1}^{\rho} 2^{k-1} \left[ \frac{1}{2} \sum_{l=k}^{\rho} \left[ 2 \left[ j 2^{-l} \right] \right] \left[ 2 \left[ R_{jl} 2^{-(l+1-k)} \right] \right] \right], \quad [\cdot], \lceil \cdot \rceil - \text{целая и дробная части}$$

вещественного числа соответственно;  $R_{jl}$  – целочисленные табличные значения числа И.М. Соболя [4];  $\rho = 1 + \lfloor \log_2 j \rfloor$ . Здесь  $\mathbf{x} = (d_1, d_2, \dots, d_n, z_1, z_2, \dots, z_m)$  – объединенный вектор варьируемых переменных.

Для каждой сгенерированной точки  $\mathbf{x}^{(k)}$  параллелепипеда (12) осуществляется проверка ограничений (5) – (10). Если все условия выполнены, точка считается допустимой, она принадлежит области  $D$ .

**Шаг 2.** Расчет выхода диазосоединения  $K$  и капитальных затрат  $\text{КЗ}$  (критериев оптимизации).

Для каждой точки области  $D$  осуществляется расчет основных потребительских характеристик и себестоимости. При этом формируется множество точек в критериальном пространстве  $\{\mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}), k = \overline{1, N_D}\}$ , где  $N_D$  – число допустимых точек в  $\text{LP}_\tau$ -последовательности.

**Шаг 3.** Формирование области Парето  $Q$ . Производится попарное сравнение всех допустимых точек из области  $D$  по значениям критериев путем проверки выполнения условий:

$$\exists v : \overline{f_v(\mathbf{x}^{(k_1)})} < \overline{f_v(\mathbf{x}^{(k_2)})}, \quad (13)$$

$$v = \overline{1, m}; \quad k_1 = \overline{1, N_D}; \quad k_2 = \overline{1, N_D}; \quad k_1 \neq k_2;$$

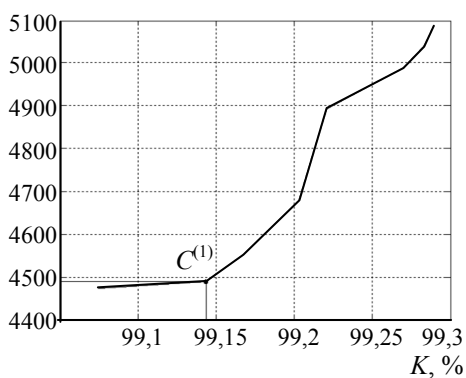
$$\exists u : \overline{f_u(\mathbf{x}^{(k_1)})} > \overline{f_u(\mathbf{x}^{(k_2)})} \wedge \forall h \neq u : \overline{f_h(\mathbf{x}^{(k_1)})} \geq \overline{f_h(\mathbf{x}^{(k_2)})}, \quad (14)$$

$$u, h = \overline{1, m}; \quad k_1 = \overline{1, N_D}; \quad k_2 = \overline{1, N_D}; \quad k_1 \neq k_2.$$

Если условие (13) выполняется, точка  $\mathbf{x}^{(k_1)}$  остается до следующей проверки в циклах по  $k_1$  и  $k_2$ , условие (14) не проверяется. Если не найдется такого  $v$ , при котором выполняется (13), производится проверка условия (14) и, если оно выполняется, точка  $\mathbf{x}^{(k_1)}$  помечается как «бесперспективная» и не участвует в дальнейших сравнениях в циклах по  $k_1$  и  $k_2$ . В результате, после отбрасывания всех точек, помеченных как «бесперспективные», в области  $D$  остаются только те точки, которые принадлежат области Парето  $Q$ .

**Шаг 4.** Выбор окончательного решения из множества эффективных точек Парето.

КЗ, у.е./т



**Рис. 2.** Область Парето для решения двухкритериальной задачи оптимизации реакторной установки диазотирования

Область Парето представлена на рис. 2. Ее анализ показывает, что при капитальных затратах  $KЗ = 4500$  у.е./т выход диазосоединения составляет  $K = 99,15\%$ , а при  $KЗ = 4675$  у.е./т –  $K = 99,2\%$ , и далее следует резкий рост капитальных затрат при незначительном увеличении выхода диазосоединения. В результате было принято решение принять в качестве оптимальной точки – точку  $C^{(1)}$ . Результаты решения двухкритериальной задачи оптимизации реакторной установки диазотирования приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты решения задачи многокритериальной оптимизации реакторной установки диазотирования по выходу диазосоединения  $K$ , %, и капитальным затратам  $KЗ$ , у.е./т**

Наименование переменных задачи	Значение переменных
1	2
<b>Конструктивные переменные</b>	
Длина реактора $L$ , м	105
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>	$20,0 \cdot 10^{-3}$

1	2
<b>Режимные переменные</b>	
Распределение температуры по зонам реактора $T^{(i)}, i = \overline{1, 3}, \text{ К}$	288,2 295,0 311,3
Распределение подачи раствора нитрита натрия по зонам реактора $\gamma^{(i)}, i = \overline{1, 3}, \%$	47,4 37,8 14,8
Концентрация нитрита натрия $c_N^{(0)}, \text{ моль/м}^3$	1460,0
Расход соляно-кислой суспензии амина $G_I^{(0)}, \text{ м}^3/\text{с}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$
Расход нитрита натрия $G_N^{(0)}, \text{ м}^3/\text{с}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Избыток, %	5
<b>Параметры неопределенности</b>	
Концентрация твердой фазы амина $[c_A^{(0)}]_s, \text{ моль/м}^3$	360
Кинетическая константа для реакции растворения ароматического амина $A$	$5,5 \cdot 10^5$
<b>Критерии оптимизации</b>	
Выход диазосоединения $K, \%$	99,14
Капитальные затраты КЗ, у.е./т	4490
<b>Значения функций-ограничений</b>	
Производительность реакторной установки $Q, \text{ т/год}$	1012
Содержание диазосмол в диазорастворе $\Pi_\chi, \%$	0,49
Содержание нитрозных газов в диазорастворе $\Pi_\sigma, \%$	0,9
Проскок амина $\Pi_\eta, \%$	0,37
Концентрация азотистой кислоты на выходе из реактора $c_{AK}, \text{ моль/м}^3$	11,8

В качестве окончательного решения задачи многокритериальной оптимизации была выбрана точка, обеспечивающая выход целевого продукта  $K = 99,14 \%$  при минимальных капитальных затратах  $\text{КЗ} = 4490 \text{ у.е./т}$ .

#### Список литературы

1. 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.
2. Дворецкий, С.И. Исследование системных связей, закономерностей функционирования и гибкости энерго- и ресурсосберегающих ХТС тонкого органического синтеза / С.И. Дворецкий, С.Г. Толстых, Е.В. Пешкова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 6–18.
3. 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.
4. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями : учеб. пособие для вузов / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М. : Дрофа, 2006. – 176 с.

## Analysis of Flexibility and Optimization of Designed Engineering Systems

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

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

**Key words and phrases:** allowable range of uncertain parameters variation; flexibility index; performance (flexibility) of technical systems; system analysis; technical system; uncertainty range.

**Abstract:** The paper formulates the two objectives of the study of performance (flexibility) of technical systems (process machinery, apparatus and systems): A – assessment of the system performance for a priori given area of uncertainty, B – quantitative assessment of index system flexibility and determination of the maximum value of the flexibility index. The example of the study of flexibility, the flexibility index of two-criterion optimization for a turbulent tube reactor of fine chemicals has been given.

---

### Analyse der Flexibilität und die Optimierung der entwerfenden technischen Systeme

**Zusammenfassung:** Es sind zwei Aufgaben der Forschung der Arbeitsfähigkeit (der Flexibilität) der technischen Systeme (der technologischen Maschinen, der Apparate und der Systeme) formuliert: A – die Einschätzung der Arbeitsfähigkeit des Systems für das a priori aufgegebenen Gebiet der Unbestimmtheit; B – die quantitative Einschätzung des Indexes der Flexibilität des Systems und die Bestimmung der maximalen Bedeutung des Indexes der Flexibilität. Es wird das Beispiel der Forschung der Flexibilität, des Indexes der Flexibilität und der Zweikriterialoptimierung für den turbulenten Rohrreaktors der feinen organischen Synthese angeführt.

---

### Analyse de la flexibilité et optimisation des systèmes techniques conçus

**Résumé:** Sont formulés deux problèmes de l'étude de la capacité de travail (flexibilité) des systèmes techniques (machines, appareils et systèmes technologiques): A – estimation de la capacité de travail du système pour un domaine de l'indétermination donné a priori; B – estimation quantitative de l'indice de la flexibilité du système et définition de la valeur maximale de l'indice de la flexibilité. Est cité l'exemple de l'étude de la flexibilité, de l'indice de la flexibilité et de l'optimisation de deux critères pour un réacteur tubulaire turbulent de la synthèse fine organique.

---

**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.