

УДК 66.011:681.5

## СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЭФФЕКТИВНОГО КОМПЛЕКСА «РЕАКТОР – УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА»

А.Н. Лабутин, В.Ю. Невиницын, Г.В. Волкова, В.А. Зайцев

*Ивановский государственный химико-технологический университет*

В работе решена задача аналитического синтеза синергетической системы управления химическим реактором для реализации сложной последовательно-параллельной экзотермической реакции. Синтез законов управления осуществляется с использованием метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов. Алгоритмический синтез закона управления проведен с использованием нелинейной математической модели объекта без применения процедуры линеаризации. Синтезированная нелинейная система управления решает задачу стабилизации концентрации целевого компонента на выходе реактора, а также позволяет автоматически переходить на новую производительность работы аппарата. Методами компьютерного моделирования показаны работоспособность и эффективность комплекса «реактор – система управления» при использовании синтезированного алгоритма.

**Ключевые слова:** химический реактор, система управления, ресурсосберегающее управление, синергетический синтез, компьютерное моделирование.

Интегрированный подход к проектированию реакторных систем предполагает совместное проектирование аппаратно-технологического оформления реакторного узла и системы управления им [1]. Основная цель этого подхода состоит в синтезе эффективного комплекса «реактор – управляющая система». При этом эффективность, как следует из теории системного анализа, характеризует процесс функционирования системы и оценивается следующими основными показателями: оперативность, энерго- и ресурсоемкость, результативность. Необходимо отметить, что эти показатели напрямую связаны с показателями качества и эффективности собственно системы управления – время процесса регулирования, перерегулирование, динамическая ошибка, статическая ошибка.

В условиях рыночной экономики (изменяющегося спроса на продукты), функциональные задачи комплекса «реактор – подсистема управления» существенно расширяются: наряду с задачами обеспечения заданной производительности по целевым веществам (стабилизация концентрации, температуры, расходов веществ) встает проблема эффективного

функционирования при переходе с одной производительности на другую [2, 3].

В силу того, что химический реактор как объект управления является многомерным, многосвязным и нелинейным, использование линейных систем автоматического управления не позволяет обеспечить работоспособность комплекса «реактор – подсистема управления» при существенных возмущениях и, соответственно, отклонениях переменных состояния от номинальных значений. Перспективным способом разработки алгоритмов управления объектами такого класса является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), который предполагает разработку и реализацию способа направленной целевой самоорганизации диссипативных нелинейных систем «объект – регулятор». При этом цель движения системы формулируется в виде желаемого инвариантного многообразия в фазовом пространстве объекта, выполняющего роль целевого аттрактора

$$\psi_S(x_1, \dots, x_n) = 0, S = 1, \dots, m [4].$$

В общем виде задача синергетического синтеза системы управления формулируется следующим образом: необ-

ходимо найти закон управления, как функцию переменных состояния объекта  $u_1(x_1, \dots, x_n), \dots, u_m(x_1, \dots, x_n)$ , который переводит изображающую точку системы в фазовом пространстве, из произвольного начального состояния, в окрестность задаваемых инвариантных многообразий, и дальнейшее движение вдоль пересече-

ния многообразий в некоторую стационарную точку или в некоторый динамический режим. В приведенных выражениях  $n$  – размерность вектора состояния,  $m$  – число внешних управлений. На траектории движения должен достигаться минимум критерия оптимальности системы:

$$J = \int_0^{\infty} \left[ \sum_{S=1}^m \left( T_S^2 \dot{\psi}_S^2 + \psi_S^2 \right) \right] d\tau \quad (1)$$

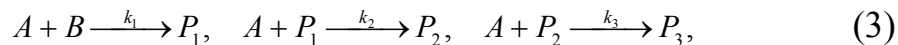
Множество устойчивых экстремалей, доставляющих минимум функционалу (1), задается уравнением

$$T_S \dot{\psi}_S + \psi_S = 0, \quad S = 1, \dots, m. \quad (2)$$

Условие асимптотической устойчивости системы в целом имеет вид  $T_S > 0$ .

Эффективность алгоритмов управления нелинейными объектами, синтезированных методами синергетической теории управления (метод АКАР), показана в ряде работ [5-17].

В настоящей работе решается задача синтеза алгоритма управления химическим реактором (рис. 1) при реализации сложной последовательно-параллельной реакции:



где  $A$  и  $B$  – исходные реагенты;  $P_1, P_2, P_3$  – продукты реакции;  $k_1, k_2, k_3$  – константы скоростей стадий. Целевым компонентом является вещество  $P_2$ .

Исходные реагенты  $A$  и  $B$  подаются в аппарат отдельными потоками. Аппарат функционирует в изотермическом режиме.

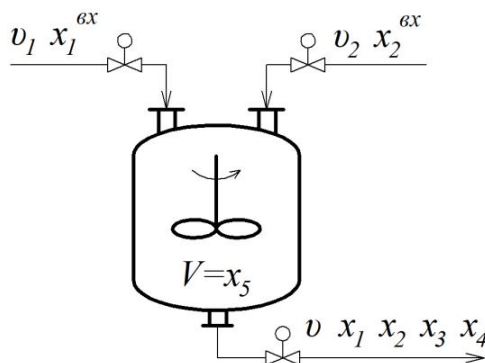


Рис. 1. Принципиальная схема химического реактора

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $x_1^{BX}$ ,  $x_2^{BX}$  – концентрации исходных реагентов;  $v_1$ ,  $v_2$  – расходы исходных реагентов;  $v$  – расход реакционной смеси на выходе из аппарата;  $x_1$ ,

$x_2, x_3, x_4$  – концентрации компонентов  $A$ ,  $B$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  в реакторе;  $V=x_5$  – объем реакционной смеси в аппарате.

Математическая модель реактора при переменном уровне (объеме) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + \frac{v_1 x_1^{6x}}{x_5} - \frac{vx_1}{x_5}; & \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 + \frac{v_2 x_2^{6x}}{x_5} - \frac{vx_2}{x_5}; \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - \frac{vx_3}{x_5}; & \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - \frac{vx_4}{x_5}; & \frac{dx_5}{d\tau} &= u - v, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $R_1 = -k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4$ ,  $R_2 = -k_1 x_1 x_2$ ,  $R_3 = k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3$ ,  $R_4 = k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4$  – скорость реакции по компонентам;  $u = v_1 + v_2$  – суммарный расход реагентов на входе в реактор.

Проведен системный анализ реактора как объекта управления. В результате системного анализа решена задача оптимизации реактора – определено соотношение расходов исходных веществ на входе в аппарат, оптимальное значение среднего времени пребывания смеси в аппарате и температура проведения реакции. Исследованы статические и динамические свойства реактора, показана его нелинейность и многосвязность [18].

Исследованы общесистемные свойства реактора – устойчивость свободного движения, управляемость и наблюдаемость. На основании результатов исследования общесистемных свойств определены варианты топологической структуры системы управления жидкофазным химическим реактором непрерывного действия для различных вариантов наблюдения объекта, обеспечивающие управляемость в пространстве состояний или управляемость в пространстве выходных переменных и стабилизируемость системы [18].

Задача системы управления химическим реактором формулируется следующим образом: необходимо синтезировать закон управления, обеспечиваю-

щий перевод аппарата с одной производительности  $G = x_4 v$  на новую производительность  $\bar{G} = \bar{x}_4 \bar{v}$  и стабилизацию концентрации целевого компонента на заданном уровне  $x_4 = \bar{x}_4$  в условиях действия возмущений. Изменение выходного потока во времени со значения  $v$  на  $\bar{v}$  может происходить по какому-либо закону, в том числе и ступенчато.

Переход на новую производительность  $\bar{G}$  с сохранением заданной концентрации  $\bar{x}_4$  возможен путем подбора определенного значения среднего времени пребывания реакционной смеси в аппарате. При заданных  $\bar{G}$ ,  $\bar{x}_4$ ,  $\bar{v}$  влиять на среднее время пребывания можно с помощью изменения объема смеси в аппарате. Поскольку объем смеси в аппарате ( $x_5$ ) входит в правые части первых четырех уравнений системы (4), то его можно рассматривать как «внутреннее» управление для  $x_4$ . В свою очередь, значение объема при заданном расходе на выходе  $\bar{v}$  определяется величиной  $u = v_1 + v_2$ , которая выступает в роли внешнего управляющего воздействия. При этом предполагается, что соотношение входных по-

токов поддерживается на постоянном уровне, т.е.  $\beta=v_1/v_2=\text{const}$ . Таким образом, канал управления концентрацией целевого компонента можно представить следующим образом:  $u \rightarrow x_5 \rightarrow x_4$ .

Перейдем к процедуре синтеза алгоритма управления химическим реактором методом АКАР. Поскольку управление  $u$  входит непосредственно в правую часть уравнения для  $x_5$  в модели (4), на первом шаге введем в рассмотрение агрегированную макропеременную, опреде-

ляющую взаимосвязь  $x_5$  и регулируемой переменной  $x_4$ :

$$\psi_1 = x_5 + v_1(x_4), \quad (5)$$

где  $v_1(x_4)$  – некоторая функция, подлежащая определению в ходе дальнейшей процедуры синтеза.

Макропеременная (5) должна удовлетворять решению основного функционального уравнения метода АКАР

$$T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0, \quad (6)$$

которое с учетом (5) в силу уравнений объекта (4) запишется:

$$T_1 \left[ u - \bar{v} + \frac{\partial v_1}{\partial x_4} \cdot \left( R_4 - \frac{\bar{v} x_4}{x_5} \right) \right] + x_5 + v_1 = 0, \quad (7)$$

где  $\bar{v}$  – новое заданное значение расхода на выходе реактора. Из (7) получаем выражение для закона управления

$$u = -\frac{x_5 + v_1}{T_1} + \bar{v} - \frac{\partial v_1}{\partial x_4} \cdot \frac{R_4 x_5 - \bar{v} x_4}{x_5}. \quad (8)$$

Управление  $u$  переводит изображающую точку замкнутой системы в окрестность инвариантного многообразия  $\psi_1=0$ , на котором реализуется связь  $x_5=-v_1$  и наблюдается эффект динамического «сжатия фазового пространства», т.е.

снижение размерности системы уравнений (4). Уравнения декомпозированной системы с учетом соотношений  $x_5=-v_1$  и  $v = \bar{v}$  примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 - \frac{v_1 x_1^{ex}}{v_1} + \frac{\bar{v} x_1}{v_1}; & \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 - \frac{v_2 x_2^{ex}}{v_1} + \frac{\bar{v} x_2}{v_1}; \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 + \frac{\bar{v} x_3}{v_1}; & \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 + \frac{\bar{v} x_4}{v_1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Функция  $v_1(x_4)$  в декомпозированной системе (9) играет роль «внутреннего» управления. Для его поиска вводится в рассмотрение второе инвариантное

многообразие, отражающее технологическое требование к системе:

$$\psi_2 = (x_4 - \bar{x}_4) = 0. \quad (10)$$

Макропеременная  $\psi_2$  удовлетворяет решению функционального уравнения

$$T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0, \quad (11)$$

которое в развернутом виде с учетом выражения (10) в силу уравнений модели (9) примет вид:

$$T_2 \left( R_4 + \frac{\bar{v}x_4}{v_1} \right) + x_4 - \bar{x}_4 = 0 \quad (12)$$

«Внутреннее» управление в соответствии с выражением (12) запишется

$$v_1 = - \frac{T_2 \bar{v} x_4}{x_4 - \bar{x}_4 + T_2 R_4} \quad (13)$$

Таким образом, закон управления  $u(x_1, \dots, x_n)$  определяется формулами (8), (13). Параметрами настройки алгоритма, определяющими качество управления, являются величины  $T_1 > 0$ ,  $T_2 > 0$ .

Для проверки работоспособности синтезированного алгоритма управления было проведено компьютерное моделирование замкнутой системы «химический реактор – управляющая подсистема». На рис. 2 приведено изменение регулируемой переменной ( $x_4$ ), объема смеси ( $x_5$ ) и управляющего воздействия ( $u$ ) при уменьшении нагрузки  $v$  на -20% в автоматическом и ручном режимах.

Алгоритм ручного перевода аппарата с одной производительности на другую следующий.

Используя математическую модель реактора, определяем такое значение объема реакционной смеси в аппарате, который обеспечивал бы заданное значение концентрации целевого компонента  $x_4 = \bar{x}_4$  при новом значении нагрузки  $\bar{v}$ . При этом соотношение расходов  $v_1$  и  $v_2$  задано.

После этого, моделируем объект при  $v_1 = v_2 = 0$  (или  $v_1 = v_2 = \max$ ). Как только объем смеси достигнет заданного уровня,

моделирование осуществляется при  $v_1 + v_2 = \bar{v}$ .

В данном случае величины расходов исходных реагентов, поступающих на вход в реактор, однозначно определяются по формулам:

$$v_1 = \beta u / (\beta + 1), \quad v_2 = u / (\beta + 1).$$

Как видно из рис. 2, преимуществом перевода аппарата на новую производительность с использованием синтезированного алгоритма является отсутствие перерегулирования по концентрации целевого компонента, что позволяет экономить ресурсы.

В результате исследования было показано, что замкнутая система «реактор – управляющая подсистема» обладает такими свойствами, как способность перехода реактора с одной производительности по целевому продукту на другую, инвариантность к возмущениям, ковариантность с задающим воздействием и асимптотическая устойчивость, обеспечивающими ресурсосбережение.

Таким образом, компьютерное моделирование показало работоспособность и эффективность комплекса «реактор – подсистема управления» при использовании синтезированного алгоритма.

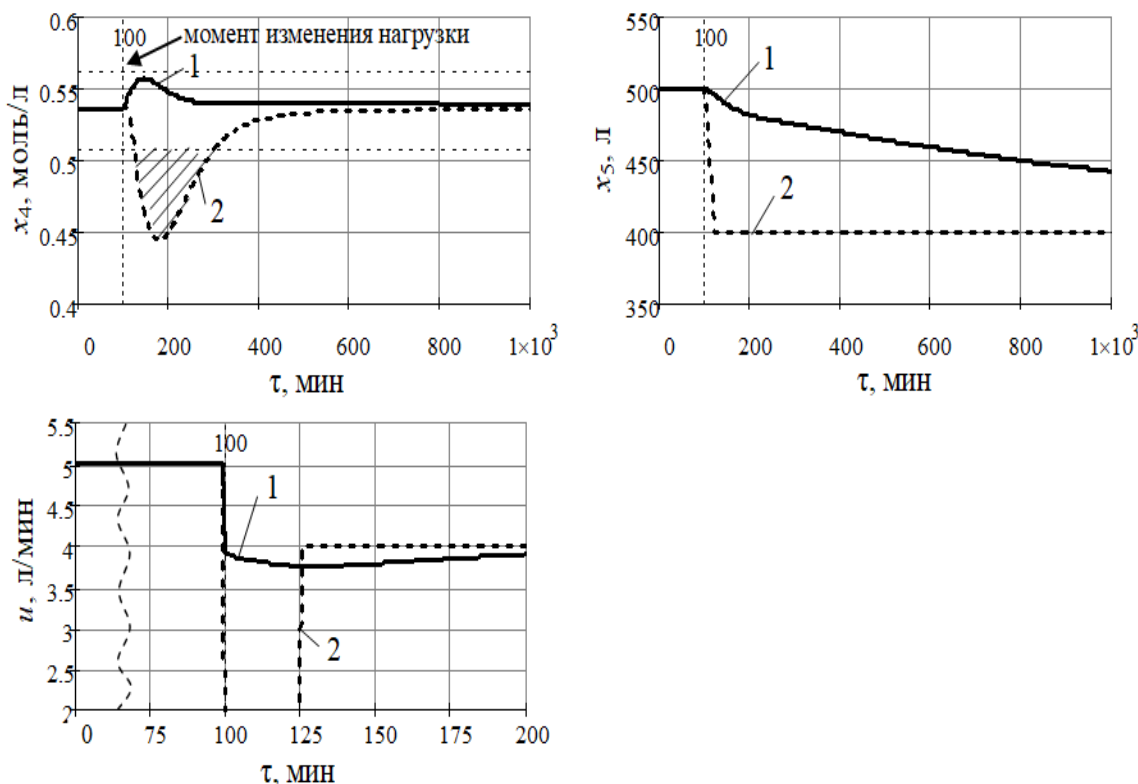


Рис. 2. Изменение регулируемой переменной ( $x_4$ ), объема смеси ( $x_5$ ) и управляющего воздействия ( $u$ ) при уменьшении нагрузки  $v$  на  $-20\%$  (1 – алгоритм управления, 2 – переход на новую производительность в ручном режиме)

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И. Постановка задач и проблемы интегрированного проектирования гибких автоматизированных химико-технологических процессов при наличии неопределенности. Ч.1 // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2003. Т. 9. №3. С. 360-381.

2. Лабутин А.Н., Гриневич П.В., Хализов Р.Л., Сучков М.Е. Режимно-технологическая оптимизация многопродуктовых реакторных систем непрерывного типа // Известия вузов. Химия и химическая технология. 1999. Т. 42. № 3. С. 139-141.

3. Gordeev L.S., Labutin A.N., Gordeeva E.L. Optimal synthesis of multiproduct resource-conserving reactor systems // Theoretical Foundations of Chemical Engineering .2014. V. 48. Issue 5. P. 637-643.

4. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.

5. Labutin A.N., Nevinityn V.Y. Analytical synthesis of chemical reactor control system // Theoretical Foundations of Chemical Engineering .2014. V. 48. Issue 3. 2014. V. 48. N 3. P. 296-300.

6. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В. Робастное управление температурным режимом химического реактора // Информатика и системы управления. 2018. № 3. С. 115-123.

7. Labutin A.N., Nevinityn V. Yu. Synthesis of chemical reactor nonlinear control algorithm using synergetic approach // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2017. Т. 60. № 2. С. 38-44.

8. Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В. Управление температурным режимом химического реактора с применением нелинейного робастного алгоритма // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2018. № 2. С. 64-68.

9. Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В. Программно-технический комплекс для проектирования и полунатурного моделирования систем управления химическими реакторами // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2016. № 2. С. 111-117.

10. Labutin A.N., Nevinityn V.Y. Analytical synthesis of chemical reactor control system // International Journal of Advanced Studies. 2016. V. 6. N 1. P. 27-37.

11. Лабутин А.Н. Синтез эффективного комплекса "реактор – управляющая система" с

использованием синергетического подхода / А.Н. Лабутин, В.Ю. Невиницын, А.Н. Деветьяров, Г.В. Волкова. // Химическая промышленность. 2014. Т. 91. № 2. С. 63-67.

12. Невиницын В.Ю., Управление реакторным узлом с распределенной подачей исходного реагента/ В.Ю. Невиницын, А.Н. Лабутин, А.Н. Деветьяров, Г.В.Волкова // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2014. № 2. С. 165-172.

13. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Деветьяров А.Н. Система управления каскадом химических реакторов для проведения последовательно-параллельной реакции // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2013. Т. 56. № 11. С. 131-135.

14. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Синергетический синтез системы управления химическим реактором // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. № 11. С. 104-107.

15. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В. Синтез и моделирование многомерной системы управления каскадом химических реакторов // Известия высших учебных заведений.

Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2012. № 2. С. 150-157.

16. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Управление химическим реактором в условиях изменения спроса на продукцию // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2012. № 3. С. 122-129.

17. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Синергетический синтез регулятора концентрации целевого компонента в каскаде химических реакторов // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2011. № 3. С. 86-92.

18. Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В., Деветьяров А.Н. Системный анализ химического реактора как объекта управления // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2017. Т. 60. № 9. С. 92-99.

*Статья публикуется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках реализации проекта №18-03-20102-г.*

*Рукопись поступила в редакцию  
22.10.2018*

#### SYNERGETIC SYNTHESIS OF EFFECTIVE COMPLEX «REACTOR – CONTROL SYSTEM»

*V. Nevinitsyn, G. Volkova, V. Zaytsev, A. Labutin*

In work the problem of analytical synthesis of the synergetic control systems of the chemical reactor for realization difficult series-parallel exothermal reactions is solved. Synthesis of laws of control is carried out with use of a method of analytical designing of the aggregated regulators. Algorithmic synthesis of the law of control was spent with use of nonlinear mathematical model of object without procedure application of the linearization. The synthesized nonlinear control system solves a problem of stabilization of concentration of a target component on a reactor exit, and also allows to pass to new productivity of work of the device automatically. The performance and effectiveness of the complex "reactor – control subsystem" using the synthesized algorithm are shown by the methods of computer simulation.

Key words: chemical reactor, control system, resource-saving control, synergetic synthesis, computer simulation.

#### References

1. Dvoreckij D.S., Dvoreckij S.I. Postanovka zadach i problemy integrirovannogo proektirovaniya gibkikh avtomatizirovannykh himiko-tehnologicheskikh processov pri nalichii neopredelennosti. CH.1. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2003. Т. 9. №3. С. 360-381.

2. Labutin A.N., Grinevich P.V., Halizov R.L., Suchkov M.E. Rezhimno-tehnologicheskaya optimizaciya mnogoproduktovykh reaktornykh sistem nepreryvnogo tipa. Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 1999.Т. 42. № 3. С. 139-141.

3. Gordeev L.S., Labutin A.N., Gordeeva E.L. Optimal synthesis of multiproduct resource-conserving reactor systems. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2014. V. 48. Issue 5. P. 637-643.

4. Kolesnikov A.A. Sinergicheskaya teoriya upravleniya. M.: ENergoatomizdat, 1994. 344 s.

5. Labutin A.N., Nevinitsyn V.Y. Analytical synthesis of chemical reactor control system. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2014. V. 48. Issue 3. 2014. V. 48. N 3. P. 296-300.

6. Labutin A.N., Nevinitsyn V.YU., Volkova G.V. Robastnoe upravlenie temperaturnym rezhimom himicheskogo reaktora. Informatika i sistemny upravleniya. 2018. № 3. С. 115-123.

7. Labutin A.N., Nevinitsyn V. Yu. Synthesis of chemical reactor nonlinear control algorithm using synergetic approach. *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2017. T. 60. № 2. S. 38-44.
8. Nevinitsyn V.YU., Labutin A.N., Volkova G.V. Upravlenie temperaturnym rezhimom himicheskogo reaktora s primeneniem nelinejnogo robastnogo algoritma. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: EHkonomika, finansy i upravlenie proizvodstvom*. 2018. № 2. S. 64-68.
9. Nevinitsyn V.YU., Labutin A.N., Volkova G.V. Programmno-tekhnicheskij kompleks dlya proektirovaniya i polunaturnogo modelirovaniya sistem upravleniya himicheskimi reaktorami. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: EHkonomika, finansy i upravlenie proizvodstvom*. 2016. № 2. S. 111-117.
10. Labutin A.N., Nevinitsyn V.Y. Analytical synthesis of chemical reactor control system. *International Journal of Advanced Studies*. 2016. V. 6. N 1. P. 27-37.
11. Labutin A.N. Sintez ehffektivnogo kompleksa "reaktor – upravlyayushchaya sistema" s ispol'zovaniem sinergeticheskogo podhoda / A.N. Labutin, V.YU. Nevinitsyn, A.N. Devet'yarov, G.V. Volkova. *Himicheskaya promyshlennost'*. 2014. T. 91. № 2. S. 63-67.
12. Nevinitsyn V.YU., Upravlenie reaktornym uzlom s raspredelennoj podachej iskhodnogo reagenta/ V.YU. Nevinitsyn, A.N. Labutin, A.N. Devet'yarov, G.V. Volkova. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: EHkonomika, finansy i upravlenie proizvodstvom*. 2014. № 2. S. 165-172.
13. Labutin A.N., Nevinitsyn V.YU., Devet'yarov A.N. Sistema upravleniya kaskadom himicheskikh reaktorov dlya provedeniya posledovatel'no-parallel'noj reakcii. *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2013. T. 56. № 11. S. 131-135.
14. Labutin A.N., Nevinitsyn V.YU. Sinergeticheskij sintez sistemy upravleniya himicheskim reaktorom. *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2012. T. 55. № 11. S. 104-107.
15. Labutin A.N., Nevinitsyn V.YU., Volkova G.V. Sintez i modelirovanie mnogomernoj sistemy upravleniya kaskadom himicheskikh reaktorov. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: EHkonomika, finansy i upravlenie proizvodstvom*. 2012. № 2. S. 150-157.
16. Labutin A.N., Nevinitsyn V.YU. Upravlenie himicheskim reaktorom v usloviyah izmeneniya sprosa na produkciju. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: EHkonomika, finansy i upravlenie proizvodstvom*. 2012. № 3. S. 122-129.
17. Labutin A.N., Nevinitsyn V.YU. Sinergeticheskij sintez regulyatora koncentracii celevogo komponenta v kaskade himicheskikh reaktorov. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: EHkonomika, finansy i upravlenie proizvodstvom*. 2011. № 3. S. 86-92.
18. Nevinitsyn V.YU., Labutin A.N., Volkova G.V., Devet'yarov A.N. Sistemyj analiz himicheskogo reaktora kak ob"ekta upravleniya. *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2017. T. 60. № 9. S. 92-99.