

УДК 66.012-52

**С.Н. Кондрашов, М.Н. Горохова**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ  
ПРОЦЕССОМ ПОЛУЧЕНИЯ ФОРМАЛЬДЕГИДА**

*Задачей вычислительного эксперимента на математической модели узла синтеза формальдегида явилось изучение влияния различных технологических факторов на целевую функцию – выход формальдегида и основные параметры процесса – соотношение метанол/формальдегид в прореагировавших газах, температуру контактного аппарата. Эксперимент проводился на гетерогенной математической модели неподвижного слоя катализатора по ротатбельному плану второго порядка Бокса – Хантера, который позволяет получить более точное математическое описание поверхности отклика по сравнению с ортогональным центрально-композиционным планом. В результате вычислительного эксперимента получена линейная регрессионная модель, которую предложено использовать для цели управления и оптимизации технологического процесса получения формальдегида.*

*На основе полученной модели с учетом значимости факторов разработан алгоритм оптимального управления технологическим процессом по критерию «выход формальдегида», в котором полученные регрессионные уравнения корректируются по мере поступления информации о значениях технологических параметров и результативных показателей. Алгоритм оптимального управления процессом включает в себя: решение задачи на модели управления, нахождение максимального выхода формальдегида при заданной нагрузке и расходе метанола, применение полученных значений нагрузки и расхода метанола на промышленном агрегате, расчет реального выхода формальдегида, расчет температуры контактного аппарата и расхода метанола на следующем такте управления, проверку условия достижения максимального выхода формальдегида с заданной точностью.*

*Проверка алгоритма на математической модели статистики контактного аппарата показала, что заданное значение целевой функции при произвольно выбранном начальном ее значении достигается за 10–15 тактов управления. На модели технологического процесса получения формальдегида для цели управления методом*

линейного программирования проведена оптимизация процесса. Установлено, что выход формальдегида достигает максимума при минимальных в области определения целевой функции расходе воздуха, соотношении метанол/вода, температуре на входе в контактный аппарат и соотношении воздух/метанол.

**Ключевые слова:** формальдегид, план эксперимента, моделирование, оптимизация, критерий, управление процессом, оптимальное управление, алгоритм.

**S.N. Kondrashov, M.N. Gorokhova**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

## **DEVELOPMENT OF ALGORITHMS OF OPTIMAL PROCESS CONTROL PRODUCTION OF FORMALDEHYDE**

*The aim of the computational experiment on the mathematical model of formaldehyde synthesis unit was to study the effect of different technological factors on the objective function - the output of formaldehyde and the main parameters of the process - the ratio of methanol / formaldehyde reacted gases, the temperature of the contact apparatus. The experiment was conducted on a mathematical model of a heterogeneous fixed bed catalyst for the second-order rotatable plan Box - Hunter, which allows a more accurate mathematical description in comparison with response surface orthogonal central - compositional plan. The results of computational experiments produced a linear regression model, which is proposed to be used for the control objectives and optimization of technological process of producing formaldehyde.*

*Based on this model, taking into account the influence of factors designed optimal control algorithm of the process by the criterion of "formaldehyde yield," which obtained regression equations adjusted as information about the values of technological parameters and performance indicators. optimal process control algorithm includes: a solution of the problem on the control model, finding the maximum yield of formaldehyde at a given load and consumption of methanol, the use of the obtained values of load and methanol consumption in the industrial unit, the real yield calculation of formaldehyde, a contact device temperature calculation and methanol consumption in the next control measure, test conditions achieve a maximum yield of formaldehyde with a given accuracy.*

*Checking the algorithm on a mathematical model of static contactor revealed that the predetermined value of the objective function for arbitrarily selected initial value it achieved 10-15 control measures.*

*On the model of the technological process of producing formaldehyde for the purpose of the control method of linear programming optimization process carried out. It is found that the formaldehyde yield reaches a maximum at the minimum in determining the objective function of air flow rate ratio of methanol - water temperature at the inlet to the contact apparatus and the air ratio - methanol.*

**Keywords:** formaldehyde, experimental design, modeling, optimization, test, process control, optimal control, algorithm.

В работе [1] показано, что критерием экономической эффективности производства формалина является прибыль, которая достигает максимума при максимальном выходе формальдегида  $R$  при наличии ряда ограничений. Поэтому задачей вычислительного эксперимента явилось изучение на полученной математической модели узла синтеза формальдегида влияния различных технологических факторов  $X_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  на целевую функцию [2, с. 74–84]:

$$R = f_1(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (1)$$

где  $n$  – число факторов.

Для решения этой задачи в химии и химической технологии используют обычно метод регрессионных моделей:

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i X_i + \sum_{k=1}^n B_{ik} X_i X_k + \sum_{i=1}^n B_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j,k=1}^n B_{ikj} X_i X_k X_j + \dots, \quad (2)$$

где  $Y$  – целевая функция отклика;  $X_i, X_j, X_k$  – факторы;  $B_0$  – свободный член уравнения регрессии;  $B_i$  – линейные эффекты;  $B_{ii}$  – квадратичные эффекты;  $B_{ik}$  – эффекты парного взаимодействия;  $B_{ikj}$  – эффекты тройного взаимодействия.

Для нахождения эффектов в уравнении (2) воспользуемся ротатбельным планом второго порядка Бокса – Хантера, который позволяет получать более точное математическое описание поверхности отклика по сравнению с ортогональным центрально-композиционным планом.

1. С учетом экспертных оценок и результатов моделирования находим зависимость выхода формальдегида от технологических факторов в виде

$$R = f_1(X_1, X_2, X_3, X_4) = f_1(C_{O_2}; C_{CH_3OH} / C_{H_2O}; T^{к.а}; C_{CH_3OH} / C_{O_2}), \quad (3)$$

где  $C_{O_2}$ ;  $C_{CH_3OH}$  и  $C_{H_2O}$  – расходы соответственно кислорода, метанола и воды, м<sup>3</sup>/с;  $T^{к.а}$  – температура на входе в контактный аппарат, К.

В этом случае матрица ротатабельного плана второго порядка имеет параметры: число факторов  $n = 4$ ; число опытов  $N = 31$ ; число опытов в центре плана  $N_0 = 7$ ; величина «звездного» плеча  $a = \pm 2$ .

2. Все факторы  $X_i$ ,  $i = \overline{1,4}$  в выражении (3) нормируем в диапазоне  $\pm 10\%$  ( $\pm 1$ ) от значений  $X_i(0)$ , соответствующих НТР:

$$X(-1) = X_i(0) \cdot 0,9, \quad i = \overline{1,4}; \quad (4)$$

$$X(+1) = X_i(0) \cdot 1,1, \quad i = \overline{1,4}; \quad (5)$$

где  $X_1(0) = 0,1608296 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $X_2(0) = 2,4167632$ ;  $X_3(0) = 390,5 \text{ К}$ ;  $X_4(0) = 3,0846679$ .

3. В соответствии с ротатабельным планом второго порядка формируем матрицу эксперимента.

4. С использованием гетерогенной математической модели неподвижного слоя катализатора [2] проводим опыт  $j = \overline{1,N}$ . С целью комплексной оценки работы реактора параллельно с нахождением значений  $R$  находим значения температуры контактного аппарата  $T^{\text{к.а}}$  и соотношения  $\text{СН}_3\text{ОН}/\text{СН}_2\text{О}$  в прореагировавших газах  $\varphi$ . Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента  
на ММ процесса контактирования

Номер опыта	Выход формальдегида $R$ , %	Соотношение $\text{СН}_3\text{ОН} / \text{СН}_2\text{О}$ в прореагировавших газах	Температура контактного аппарата $T^{\text{к.а}}$ , К
1	0,817	0,129	968
9	0,829	0,086	950
3	0,835	0,108	962
4	0,827	0,091	934
5	0,807	0,142	925
6	0,826	0,088	945
7	0,822	0,123	946
8	0,829	0,093	917
9	0,835	0,102	940
10	0,840	0,069	940
11	0,811	0,123	933
12	0,837	0,073	933
13	0,837	0,097	944

Окончание табл. 1

Номер опыта	Выход формальдегида $R$ , %	Соотношение $\text{CH}_3\text{OH} / \text{CH}_2\text{O}$ в прореагировавших газах	Температура контактного аппарата $T^{\text{к.а}}$ , К
14	0,842	0,066	944
15	0,841	0,094	947
16	0,844	0,064	947
17	0,853	0,065	947
18	0,815	0,120	947
19	0,833	0,093	947
20	0,839	0,090	947
21	0,837	0,090	948
22	0,802	0,132	948
23	0,851	0,067	948
24	0,822	0,131	948
25	0,833	0,094	948
26	0,833	0,094	948
27	0,833	0,091	950
28	0,833	0,094	948
29	0,822	0,093	948
30	0,822	0,097	948
31	0,834	0,086	948

Проведя регрессионный анализ результатов вычислительного эксперимента по описанному в работе алгоритму, получаем уравнения регрессии следующего вида:

$$R = 1,14 - 16,26X_1 - 1,538 \cdot 10^{-3}X_2 - 4,64 \cdot 10^{-4}X_3 - 1,718 \cdot 10^{-2}X_4, \quad (6)$$

относительная ошибка аппроксимации  $\delta = 0,64 \%$ ;

$$\begin{aligned} \varphi = & 0,404 + 26,8X_1 + 2,447 \cdot 10^{-3}X_2 + \\ & + 5,268 \cdot 10^{-4}X_3 + 5,62 \cdot 10^{-2}X_4, \end{aligned} \quad (7)$$

$\delta = 6,39 \%$ ;

$$T^{\text{к.а}} = 816 + 1809 X_1 + 13,79 X_2 + 0,2013 X_3 + 7,414 X_4; \delta = 0,69 \%. \quad (8)$$

Из уравнений (6)–(8) следует, что зависимости  $R = f_1(X_i)$ ;  $\varphi = f_2(X_i)$ ;  $T^{\text{к.а}} = f_3(X_3)$ ,  $i = 1, 4$  являются линейными, а все факторы – значимыми. Однако вклад факторов в значение целевой функции далеко не одинаков, и поэтому для цели управления и оптимизации можно использовать лишь некоторые, самые существенные из них, в частности  $X_1$  – расход кислорода  $C_{\text{O}_2}$  и  $X_4$  – соотношение расходов  $\text{CH}_3\text{OH}$  и  $\text{O}_2$   $C_{\text{CH}_3\text{OH}} / C_{\text{O}_2}$ .

Полученные регрессионные уравнения при использовании их в алгоритме управления процессом получения формальдегида корректируются по мере поступления информации о значениях технологических параметров и результативных показателей ( $R$  и  $\varphi$ ).

Выше был определен технико-экономический критерий оптимальности производства формалина – выход формальдегида  $R$  и найдено выражение для его расчета (6). Для нахождения максимума  $R$  исследуем поверхность отклика  $R = R(X)$  методом линейного программирования с наложением ограничений по  $\varphi$  и  $T^{к.а}$ :

$$\left\{ R = R(X) \rightarrow \max \left\{ \begin{array}{l} \varphi - \varphi^{\text{зад}} = 0; \\ T^{\text{к.а}} - T_{\min}^{\text{к.а}} \geq 0; \\ T^{\text{к.а}} - T_{\max}^{\text{к.а}} \leq 0; \end{array} \right. \right\} \rightarrow \begin{array}{l} C_{\text{O}_2 \text{ opt}}; (C_{\text{м}} / C_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{opt}}; \\ T_{\text{вх opt}}^{\text{к.а}}; (C_{\text{м}} / C_{\text{O}_2})_{\text{opt}}. \end{array} \quad (9)$$

В выражении (9) ограничения по составу формалина вводятся по ГОСТ 1625-89Е, ограничения по температуре контактного аппарата – по требованиям технологического регламента.

Исходная система ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 = b_1; \\ a_5 X_1 + a_6 X_2 + a_7 X_3 + a_8 X_4 \leq b_2; \\ a_5 X_1 + a_6 X_2 + a_7 X_3 + a_8 X_4 \leq b_3; \\ X_1 \geq b_4; \\ X_1 \leq b_5; \\ X_2 \geq b_6; \\ X_2 \leq b_7; \\ X_3 \geq b_8; \\ X_3 \leq b_9; \\ X_4 \geq b_{10}; \\ X_4 \leq b_{11}, \end{array} \right. \quad (10)$$

где  $X_i, i = 1, 4$  – факторы в уравнениях (6)–(8);  $a_j, j = 1, 8$  – коэффициенты в уравнениях (6)–(8);  $b_1 = 0,404 + \varphi^{\text{зад}}$ ,  $\varphi^{\text{зад}} = 0,1$  – заданное соотношение метанол/формальдегид в прореагировавших газах;  $b_2 = -816 + T_{\min}^{\text{к.а}}$ ;  $T_{\max}^{\text{к.а}} = 710$  К и  $T_{\min}^{\text{к.а}} = 690$  К – крайние значения температуры контактного аппарата;  $b_k, k = 4, 11$  – крайние значения факторов  $X_i, i = 1, 4$  в области определения  $R$ .

Из (10) методом искусственного базиса получаем систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_3 = b'_1 - a'_1 X_1 - a'_2 X_2 - a'_4 X_4; \\ X_5 = b'_2 + a'_5 X_1 - a'_6 X_2 + a'_8 X_4 + X_{15}; \\ X_6 = b'_3 - a'_5 X_1 + a'_6 X_2 - a'_8 X_4; \\ X_7 = X_1 - b_4; \\ X_8 = b_5 - X_1 + X_{15}; \\ X_9 = X_2 - b_6; \\ X_{10} = b_7 - X_2 + X_{15}; \\ X_{11} = b'_8 - a'_1 X_1 - a'_2 X_2 - a'_4 X_4; \\ X_{12} = b'_9 + a'_1 X_1 + a'_2 X_2 + a'_4 X_4 + X_{15}; \\ X_{13} = X_4 - b_{10}; \\ X_{14} = b_{11} - X_4 + X_{15}. \end{array} \right. \quad (11)$$

Система (11) решается симплекс-методом Данцига.

Для условий, соответствующих полученным уравнениям (6)–(8),

$$R_{\max} = R(X_1(-1); X_2(-1); X_3(-1); X_4(-1)) = 0,864. \quad (12)$$

Таким образом, выход формальдегида достигает максимума при минимальных в области определения функции  $R$  расходе кислорода  $C_{O_2}$ ; соотношении  $C_{CH_3OH}/C_{H_2O}$ ; температуре на входе в контактный аппарат  $T_{\text{вх}}^{\text{к.а}}$  и соотношении  $C_{CH_3OH}/C_{O_2}$ .

Учитывая, что в выражении (6) факторы  $X_2$  – соотношение  $C_{CH_3OH}/C_{H_2O}$  и  $X_3$  – температура на входе в контактный аппарат  $T_{\text{вх}}^{\text{к.а}}$  малозначимы, запишем

$$R = f_1(C_{O_2}, C_{CH_3OH}/C_{O_2}) = b_0 - b_1 \cdot X_1 - b_4 \cdot X_4. \quad (13)$$

Тогда алгоритм оптимального управления технологического процесса получения формалина будет выглядеть следующим образом [3]:

1. На модели управления решаем задачу, находим максимальный выход формальдегида  $R_{\max}$  при заданной нагрузке  $G_{\text{в}} - \text{const}$  и соответствующий ему расход метанола  $G_{CH_3OH}^{\text{opt}}$ .

2. Устанавливаем  $G_{CH_3OH}^{\text{opt}}$  и  $G_{\text{в}}$  на агрегате; рассчитываем реальный выход формальдегида  $R[n]$  по данным газового анализа либо по формуле Уокера:

$$R[n] = 0,9375 [100 - 100(\{C_{CO_2} + C_{CO} + C_{CH_4}\} / (2C_{CH_4} + C_{H_2} + 0,528C_{N_2} - 2C_{CO_2} - C_{CO} - 2C_{O_2}))], \quad (14)$$

где  $n$  – номер такта управления; либо по формуле Щербаня:

$$R[n] = (1,05C_{H_2} + 0,563C_{N_2} - 3,07C_{CO_2} - 2,16C_{CO} - 0,8C_{CH_4} - 2,1C_{O_2}) / (1,12C_{H_2} + 0,6C_{N_2} + 0,4C_{CH_2} - 2,15C_{CO_2} - 1,17C_{CO} - 2,25C_{O_2}). \quad (15)$$

3. В выражении (13) с целью упрощения принимаем  $b = \text{const}$ ;  $b_4[n] = \text{const}$  и рассчитываем  $b_1[n]$  по формуле

$$b_1[n] = (b_1[n-1] + R[n] - R_{\max}) / (C_M[n-1]). \quad (16)$$

4. Вычисляем  $G_M[n]$ :

$$G_M[n] = G_B/b_4 (b_0 - b_1[n]*G_B - R_{\max}). \quad (17)$$

5. Проверяем выполнение условия  $R_{\max} - R[n] < \epsilon$ . Если условие не выполняется, то цикл повторяется с п. 2.

Для проверки предложенного алгоритма управления технологическим процессом получения формальдегида было проведено моделирование работы агрегата формалина с использованием математической модели статики контактного аппарата [2]. Результаты моделирования представлены на рис. 1 и 2.

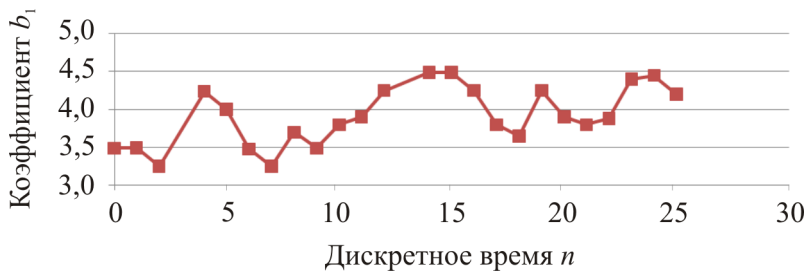


Рис. 1. Изменение коэффициента  $b_1[n]$  в уравнении (13) при управлении технологическим процессом получения формальдегида по адаптивному алгоритму

Анализ полученных результатов показывает, что управление процессом получения формальдегида в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом позволяет выйти на заданное значение целевой функции из выбранного случайным образом исходного состояния системы за 10–15 тактов управления.



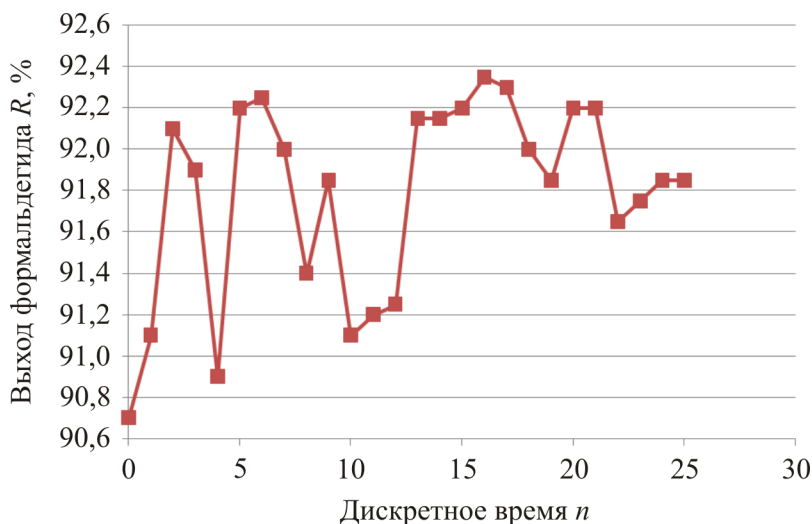


Рис. 2. Изменение выхода формальдегида  $R[n]$  при управлении технологическим процессом получения формальдегида по адаптивному алгоритму

Таким образом, для цели управления и оптимизации технологического процесса синтеза формальдегида получена линейная регрессионная модель. С учетом значимости факторов разработан алгоритм оптимального управления технологического процесса по критерию «выход формальдегида». Проверка алгоритма на математической модели статистики контактного аппарата показала, что заданное значение целевой функции при произвольно выбранном начальном ее значении достигается за 10–15 тактов управления. На модели технологического процесса получения формальдегида для цели управления методом линейного программирования проведена оптимизация процесса.

Установлено, что выход формальдегида достигает максимума при минимальных в области определения целевой функции расходе воздуха, соотношении метанол/вода, температуре на входе в контактный аппарат и соотношении воздух/метанол.

Результаты оптимизации процесса получения формалина изложены в патентах [4–7], предложенный подход к управлению технологическими процессами – в патентах [8, 9].

### Список литературы

1. Шумихин А.Г., Чарная Е.Б., Кондрашов С.Н. Управление производством формалина с использованием технико-экономических критериев // Химическая промышленность. – 1997. – № 1. – С. 74–76.

2. Кондрашов С.Н. Разработка и исследование алгоритмов управления производством формалина: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1994. – 150 с.

3. Способ управления процессом получения формалина: пат. 1669911 Рос. Федерация / А.Г. Шумихин, С.Н. Кондрашов, В.В. Майер. – № 4473379/88; заявл. 11.08.88; опубл. 15.08.91, Бюл. № 30. – 6 с.

4. Способ управления процессом синтеза формальдегида: пат. 1807050 Рос. Федерация / В.Г. Меренков, А.Г. Шумихин, С.Н. Кондрашов, Р.Н. Исхаков, Н.И. Бродникова, И.В. Баталова, В.В. Майер. – № 4884771/90; заявл. 26.11.90; опубл. 07.04.93, Бюл. № 13. – 4 с.

5. Способ автоматического управления процессом получения формалина: пат. 2058289 Рос. Федерация / А.Г. Шумихин, С.Н. Кондрашов, В.В. Майер, В.Г. Меренков, М.Г. Гарейшин. – № 4769648/89; заявл. 18.12.89; опубл. 20.04.96, Бюл. № 11. – 7 с.

6. Способ управления процессом многоступенчатой абсорбции: пат. 2055633 Рос. Федерация / С.Н. Кондрашов, А.Г. Шумихин. – № 92002656/92; заявл. 29.10.92; опубл. 10.03.96, Бюл. № 7. – 4 с.

7. Способ управления процессом многоступенчатой абсорбции: пат. 2077929 Рос. Федерация / С.Н. Кондрашов, А.Г. Шумихин, В.Г. Меренков. – № 93044782/93; заявл. 16.09.93; опубл. 27.04.97, Бюл. № 12. – 5 с.

8. Смесительное устройство реактора каталитического крекинга углеводородов: пат. 2280503 Рос. Федерация / В.А. Крылов, М.Ю. Егоров, А.Н. Борисов, С.Н. Кондрашов. – № 2004135765; заявл. 6.12.04; опубл. 27.07.06, Бюл. № 21. – 6 с.

9. Плехов В.Г., Кондрашов С.Н., Шумихин А.Г. Применение многоуровневой математической модели каталитического риформинга бензиновых фракций в системе управления промышленными установками // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 7. – С. 37–42.

## References

1. Shumikhin A.G., Charnaya E.B., Kondrashov S.N. Upravlenie proizvodstvom formalina s ispolzovaniem tekhniko-ekonomicheskikh kriteriev [Production Management formalin using technical and economic criteria]. *Chemical industry*, 1997, no. 1, pp. 74–76.

2. Kondrashov S.N. Razrabotka i issledovanie algoritmov upravleniya proizvodstvom formalina [Development and research of control algorithms production duction of formalin]: Thesis of doctor`s degree dissertation. Perm, 1994. 150 p.

3. Shumikhin A.G., Kondrashov S.N., Mayer V.V. Sposob upravleniya protsessom polucheniya formalina [Method of controlling a process producing formaldehyde]. Patent No. 1669911 RF. 1991.

4. Merenkov V.G., Shumikhin A.G., Kondrashov S.N., Iskhakov R.N., Brodnikova N.I., Batalov I.V., Mayer V.V. Sposob upravleniya protsessom sinteza formaldegida [A method of controlling formaldehyde synthesis process]. Patent No. 1807050 RF. 1993.

5. Shumikhin A.G., Kondrashov S.N., Majer V.V., Merenkov V.G., Gareyshin M.G. Sposob avtomaticheskogo upravleniya protsessom polucheniya formalina [The method of automatic control of the process of obtaining the formalin]. Patent No. 2058289 RF. 1996.

6. Kondrashov S.N., Shumikhin A.G. Sposob upravleniya protsessom mnogostupenchatoj absorbtсии [A method for controlling a multi-stage absorption process]. Patent No. 2055633 RF. 1996.

7. Kondrashov S.N., Shumikhin A.G., Merenkov V.G. Sposob upravleniya protsessom mnogostupenchatoj absorbtсии [A method for controlling a multi-stage absorption process]. Patent No. 2077929 RF. 1997.

8. Krylov V.A., Egorov M.Y., Borisov A.N., S.N. Kondrashov. Smesitelnoe ustrojstvo reaktora kataliticheskogo krekinga uglevodorodov [Mixing device hydrocarbon catalytic cracking reactor]. Patent No. 2280503 RF. 2006.

9. Plekhov V.G., Kondrashov S.N., Shumikhin A.G. Primenenie mnogo-urovnevoj matematicheskoj modeli kataliticheskogo riforminga benzinovykh fraktsij v sisteme upravleniya promyshlennymi ustanovkami [The use of multi-level mathematical model of catalytic reforming of gasoline fractions in industrial installations management system]. *Automation in the industry*, 2009, no. 7. pp. 37–42.

Получено 11.02.2016

### Об авторах

**Кондрашов Сергей Николаевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 9, корпус Б; e-mail: Sergej.Kondrashov@pnos.lukoil.com).

**Горохова Мария Николаевна** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры автоматизации технологических процессов и производств Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 9, корпус Б; e-mail: mari.gorokhova.92@mail.ru).

#### **About the authors**

**Sergej N. Kondrashov** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate professor, Chemical Engineering Department, Perm National Research Polytechnic University (9, Pozdeev Professor str., Perm, 614013, Russian Federation; e-mail: Sergej.Kondrashov@pnos.lukoil.com).

**Mariya N. Gorokhova** (Perm, Russian Federation) – Undergraduate, Chemical Engineering Department, Perm National Research Polytechnic University (9, Pozdeev Professor str., Perm, 614013, Russian Federation; e-mail: mari.gorokhova.92@mail.ru).