

DOI: 10.15593/2224-9400/2016.4.01

УДК 66.012-52

С.Н. Кондрашов, А.С. БортниковаПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ УЗЛОМ
КОНТАКТИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ФОРМАЛИНА
ПОДАЧЕЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПОТОКА ВОЗДУХА**

Представлены результаты исследования распределенной по высоте и сечению контактного слоя подачи воздуха на процесс синтеза формальдегида на пемзосеребряном катализаторе.

Методом вычислительного эксперимента на математической модели, представляющей собой замкнутую систему дифференциальных уравнений материального и теплового балансов на зерне и в слое катализатора, и опытным путем на лабораторной установке показано, что введение в слой катализатора дополнительного потока воздуха, распределенного по сечению слоя, с количеством кислорода 0–10 % от количества кислорода основного потока воздуха позволяет варьировать состав формалина в пределах: по метанолу 0,7–3,7 %, по формальдегиду 37–39 %. При этом появляется возможность увеличить общую конверсию и выход формальдегида на 3–5 %. Селективность (избирательность) образования формальдегида при подаче дополнительного воздуха не уменьшилась (осталась практически постоянной) и составила 92 %. Максимальный выход формальдегида наблюдается при вводе дополнительного воздуха в контактный слой на уровне 2/3 высоты слоя от места ввода реакционной смеси. Совпадение результатов вычислительного и лабораторного экспериментов при воспроизводимости последнего позволяет заключить, что использованная модель адекватна исследуемому процессу, а полученные закономерности для серебряного катализатора не зависят от масштаба аппарата и могут быть использованы для совершенствования промышленных процессов синтеза формальдегида.

Методом регрессионного анализа результатов вычислительного эксперимента на математической модели статичности контактного аппарата получена модель процесса синтеза формальдегида при подаче дополнительного количества воздуха в слой катализатора.

С использованием метода линейного программирования проведена оптимизация процесса синтеза формальдегида. Установлено, что целевая функция – выход формальдегида достигает мак-

симула в своей области определения при минимальном соотношении расходов дополнительного и основного потоков воздуха и максимальном расходе дополнительного потока воздуха.

Предложен способ управления процессом контактирования подачей дополнительного количества воздуха в слой катализатора, позволяющий увеличить выход формальдегида на 3–5 %, снизить температуру процесса на 20–30 К, увеличить пробег катализатора.

Ключевые слова: производство формалина, синтез формальдегида, контактный аппарат, пемзосеребряный катализатор, дополнительный поток воздуха, математическая модель, лабораторная установка, вычислительный эксперимент, регрессионный анализ, линейное программирование, алгоритм управления.

S.N. Kondrashov, A.S. Bortnikova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DEVELOPMENT OF CONTROL ALGORITHM FOR THE NODE CONTACT OF FORMALIN PRODUCTION SUPPLY ADDITIONAL AIR FLOW

The article presents the results of a study distributed over the height and cross-section of the contact layer on the air of formaldehyde synthesis process in the letters-zoserebryanom catalyst.

The method of computing experiment on the mathematical model, pre-is a closed system of differential equations for material and heat balances in the grain and in the catalyst bed, and empirically on laboratory-term installation shows that the introduction of a layer of additional air flow catalyst distributed on the section of the bed, an oxygen amount of 0-10% of Audio Output of our main airflow oxygen allows to vary the composition within formalin: methanol 0,7-3,7%, by 37-39% formaldehyde. At the same time there is a cart-possibility to increase the overall conversion and formaldehyde yield of 3-5%. Selectivity (selectivity) of formaldehyde formation when applying additional air is not decreased (remained almost constant) and amounted to 92%. The maximum yield of formaldehyde is observed when entering the secondary air in the contact layer at the level of 2/3 of the height of the space layer input of the reaction mixture. The coincidence of the results of computational and laboratory experiments for reproducibility latter allows us to conclude that the used model adequately researched process, and the resulting patterns for the silver catalyst does not depend on the scale of the device and can be used for the improvement of industrial processes synthesis of formaldehyde.

By regression analysis of the results of computational experiment on the mathematical model of static contactor obtained model processes sa synthesis of formaldehyde when submitting an additional amount of air into a layer ca-catalyst.

Using the method of linear programming has been optimized formaldehyde synthesis process. It has been established that the objective function - the output odds-formaldehyde peaks in your domain with minimal RATIO-carrying costs and additional primary air flow and maximum-races during the additional air flow.

A method for process control of contacting feed additional air quantity-tary in the catalyst layer, which allows to increase yield formaldehyde at 5.3% to reduce the processing temperature of 20-30 K, increase catalyst mileage.

Keywords: *production of formalin, formaldehyde synthesis, contact apparatus, pemzoserebryany catalyst, an additional air flow, mathematical model laboratory plant, numerical simulation, regression analysis, linear programming, control algorithm.*

Исследование влияния распределенной по высоте и сечению контактного слоя подачи воздуха на процесс синтеза формальдегида

Для повышения конверсии метанола в процессе синтеза формальдегида используют многослойный катализатор в виде кристаллов серебра различных размеров, в частности применение двухслойного катализатора позволяет проводить процесс с конверсией метанола до 97,4 % при селективности (избирательности) образования формальдегида 89–90 % [1].

Другим вариантом решения задачи повышения конверсии метанола является использование секционных реакторов [1]. Основное отличие секционированного реактора от односекционного реактора многослойного заключается в том, что часть воздуха подается совместно с потоком сырья, а часть отдельно – на каждую секцию. На первой секции двухсекционного реактора обычно используют серебро в виде сетки или нанесенное на оксид алюминия, на второй секции – кристаллы серебра размером $(0,2-1,5) \cdot 10^{-3}$ м или состав, приготовленный спеканием двух слоев серебра. Конверсия метанола в этом процессе составляла 97–98 %, селективность 88–90 %. Секционирование реакторов с катализаторами типа «серебро на пемзе» не нашло практического применения вследствие падения селективности основной реакции при повышении конверсии метанола.

Для решения задачи повышения конверсии метанола при неизменной селективности процесса контактирования на пемзосеребряном катализаторе было исследовано влияние распределенной по высоте и сечению слоя катализатора подачи воздуха на основные показатели процесса.

Для предварительной оценки реакции системы контактирования на подачу дополнительного количества воздуха было проведено моделирование процесса контактирования с использованием математической модели, представляющей собой замкнутую систему дифференцированных уравнений материального и теплового балансов на зерне и в слое катализатора [2]. Входные параметры, параметры состояния и коэффициенты модели были рассчитаны в соответствии с регламентом производства формалина. При этом были приняты следующие концентрации компонентов в исходной смеси, подаваемой с объемной скоростью $V = 7,65 \text{ с}^{-1}$ в контактный слой: для метанола $C_M^{(0)} = 0,0135164 \text{ кмоль/м}^3$, для кислорода основного потока воздуха $C_{O_2}^{(0)} = 0,0043818 \text{ кмоль/м}^3$, для воды $C_{H_2O}^{(0)} = 0,099427 \text{ кмоль/м}^3$. Температура реакционной смеси на входе в слой была принята $T = 398 \text{ К}$, высота слоя $L = 9 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Дополнительный поток воздуха вводили в слой катализатора на высоте $L = (4, 5, 6, 7) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ с количеством кислорода $C_{\text{доп}}$, равным 0, 5, 10 % от количества кислорода основного потока воздуха C_{O_2} . Система уравнений решалась методами Ньютона – Рафсона и Рунге – Кутты с учетом изменения коэффициентов массо- и теплоотдачи от поверхности зерна потоку газа по высоте слоя вследствие изменения температуры слоя и концентрации компонентов. Полученные результаты представлены в табл. 1.

По данным табл. 1 на рис. 1–3 построены зависимости состава прореагировавших газов от высоты ввода в слой дополнительного потока воздуха и концентрации кислорода и рассчитаны определяющие параметры процесса: избирательность, общая конверсия и выход формальдегида.

Выход формальдегида K_f рассчитывали в виде отношения количества метанола, пошедшего на образование формальдегида, к общему количеству метанола в смеси, общую конверсию $K_{\text{общ}}$ – как отношение количества прореагировавшего метанола к общему количеству метанола в смеси, а избирательность S – как отношение выхода формальдегида к общей конверсии:

$$K_{\phi} = \frac{C_{\phi}}{C_{\text{м}} + C_{\text{CO}_2} + C_{\phi}}; \quad (1)$$

$$K_{\text{общ}} = \frac{C_{\text{CO}_2} + C_{\phi}}{C_{\text{м}} + C_{\text{CO}_2} + C_{\phi}}; \quad (2)$$

$$S = \frac{K_{\phi}}{K_{\text{общ}}}, \quad (3)$$

где C_{ϕ} , $C_{\text{м}}$, C_{CO_2} – концентрации соответственно формальдегида, метанола и диоксида углерода в прореагировавших газах, кмоль/м³.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента на математической модели процесса контактирования при вводе дополнительного количества воздуха в слой катализатора

Высота ввода в слой дополнительного кол-ва воздуха I , м·10 ⁻²	Кол-во дополнительного воздуха, % C_{O_2}	Концентрации компонентов в прореагировавшей смеси на выходе из контактного аппарата, ·10 ⁵ кмоль/м ³					
		Метанол $C_{\text{м}}$	Кислород C_{CO_2}	Вода $C_{\text{H}_2\text{O}}$	Диоксид углерода C_{CO_2}	Водород C_{H_2}	Формальдегид C_{ϕ}
4	0	116,112	2,186	1720,44	132,443	312,835	1236,28
	5	75,293	3,188	1839,36	144,618	323,035	1274,88
	10	56,735	4,716	1957,62	158,506	309,864	1236,09
5	0	116,112	2,186	1720,44	132,443	312,835	1236,28
	5	54,649	4,299	1833,73	144,820	324,442	1293,92
	10	35,954	7,016	1948,18	158,485	309,609	1304,88
6	0	116,112	2,186	1720,44	132,443	312,835	1236,28
	5	41,856	7,100	1825,71	145,192	318,733	1304,49
	10	227,717	13,07	1933,00	158,797	300,728	1309,44
7	0	116,112	2,186	1720,44	132,443	312,835	1236,28
	5	43,772	14,11	1812,53	144,495	314,268	1301,81
	10	34,375	28,17	1905,34	156,865	294,572	1302,15

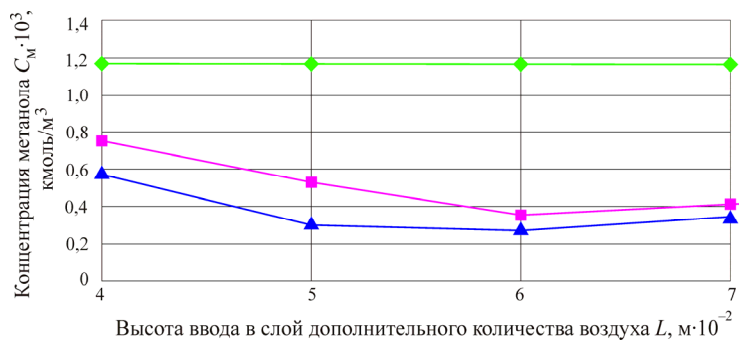


Рис. 1. Зависимость концентрации метанола в прореагировавшей смеси от высоты ввода и количества дополнительного воздуха: \blacklozenge – $C_{доп} = 0$; \blacksquare – $C_{доп} = 0,05 C_{O_2}$; \blacktriangle – $C_{доп} = 0,1 C_{O_2}$

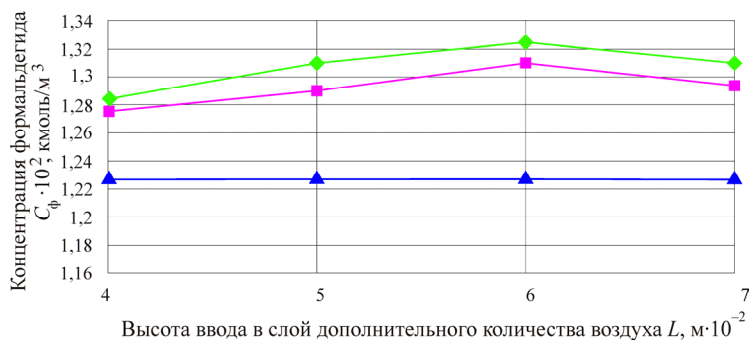


Рис. 2. Зависимость концентрации формальдегида в прореагировавшей смеси от высоты ввода и количества дополнительного воздуха: \blacklozenge – $C_{доп} = 0$; \blacksquare – $C_{доп} = 0,05 C_{O_2}$; \blacktriangle – $C_{доп} = 0,1 C_{O_2}$

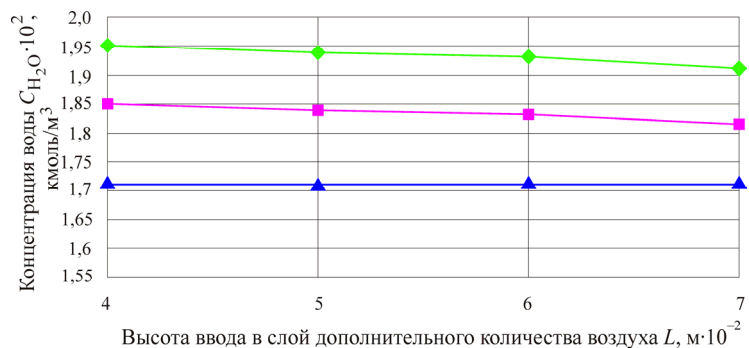


Рис. 3. Зависимость концентрации воды в прореагировавшей смеси от высоты ввода и количества дополнительного воздуха: \blacklozenge – $C_{доп} = 0$; \blacksquare – $C_{доп} = 0,05 C_{O_2}$; \blacktriangle – $C_{доп} = 0,1 C_{O_2}$

Рассчитанные по формулам (1)–(3) показатели процесса синтеза формальдегида представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели процесса синтеза формальдегида,
рассчитанные по данным вычислительного эксперимента

Высота ввода в слой дополнительного кол-ва воздуха L , $\text{м} \cdot 10^{-2}$	Кол-во дополнительного воздуха $C_{\text{доп}}$, % C_{O_2}	Общая конверсия $K_{\text{общ}}$, %	Выход формальдегида $K_{\text{ф}}$, %	Избирательность S , %
4	0	0,92	0,83	0,90
	5	0,95	0,85	0,895
	10	0,95	0,85	0,895
5	0	0,92	0,83	0,90
	5	0,96	0,87	0,90
	10	0,98	0,87	0,89
6	0	0,92	0,83	0,90
	5	0,97	0,88	0,905
	10	0,98	0,88	0,90
7	0	0,92	0,83	0,90
	5	0,97	0,87	0,895
	10	0,98	0,87	0,89

Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает, что подача в аппарат синтеза формальдегида при прочих равных условиях дополнительного количества воздуха позволяет варьировать состав готового продукта в пределах: по метанолу 0,8–3,5 %, по формальдегиду 37–39 %. При этом имеется возможность увеличить общую конверсию и выход формальдегида на 3–5 %.

Для экспериментальной проверки результатов моделирования была проведена серия опытов на лабораторной установке АООТ «Метафракс», основные узлы которой соответствуют технологической схеме производства формалина. Установка была дополнена нами узлом подачи распределенного по высоте и сечению слоя катализатора воздуха, состоящим из модернизированного контактного аппарата и системы регулирования дополнительного потока воздуха. Показатели процесса контактирования рассчитывались по результатам анализа абгазов по методике, предложенной Уокером [3]. По стехиометрическим соотношениям реакций, протекающих при синтезе формальдегида, рассчитывалось количество прореагировавшего метанола и количество

метанола, пошедшего на образование формальдегида. Общее количество пропущенного через установку метанола G_M определялось по формуле

$$G_M = \frac{G_{см} \cdot 100}{70 \cdot p}, \quad (4)$$

где $G_{см}$ – расход спиртоводной смеси, $см^3/с$; p – плотность смеси, $г/см^3$.

Далее определялись основные показатели процесса синтеза формальдегида: общая конверсия $K_{общ}$ как отношение количества прореагировавшего метанола к количеству пропущенного метанола, выход формальдегида $K_{ф}$ как отношение количества метанола, пошедшего на образование формальдегида, к количеству пропущенного метанола и избирательность S как отношение выхода формальдегида к общей конверсии. Рассчитанные таким образом и усредненные по сериям опытов показатели представлены в табл. 3. Воспроизводимость результатов эксперимента и расчетных показателей процесса подтверждена параллельными опытами: по 3 опыта в каждой точке ввода дополнительного воздуха (табл. 3).

Таблица 3

Показатели процесса синтеза формальдегида на лабораторной установке при подаче дополнительного количества воздуха в слой катализатора

Высота ввода в слой дополнительного кол-ва воздуха L , $м \cdot 10^{-2}$	Кол-во дополнительного воздуха $C_{доп}$, % CO_2	Общая конверсия $K_{общ}$, %	Выход формальдегида $K_{ф}$, %	Избирательность S , %
4	0	92,5	85,4	92,2
	10	92,8	85,8	92,5
5	0	92,0	84,7	92,0
	10	92,7	85,6	92,3
6	0	92,7	86,2	92,9
	10	98,4	91,6	93,1
7	0	96,0	88,4	92,0
	10	97,2	89,6	92,2

По данным табл. 3 построены зависимости общей конверсии, выхода формальдегида и избирательности от высоты ввода дополнительного количества воздуха (рис. 4).

Данные табл. 3 и рис. 4 показывают, что при подаче распределенного по высоте и сечению контактного слоя воздуха в аппарат син-

теза увеличиваются как общая конверсия, так и выход формальдегида; избирательность при этом практически не изменяется. Следовательно, изменением расхода дополнительного воздуха в диапазоне 0–10 % от расхода основного воздуха ($G_{\text{доп}} \leq 0,1 G_{O_2}$ по соображениям взрывобезопасности), выход формальдегида можно изменять в пределах 85–91 %, тем самым изменяя содержание формальдегида и метанола в готовом продукте в пределах: по формальдегиду 37–39 %, по метанолу 0,7–3,7 %.

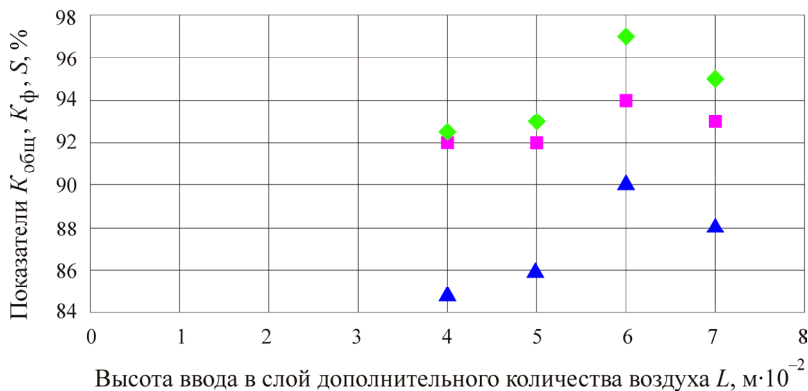


Рис. 4. Зависимость общей концентрации $K_{\text{общ}}$, выхода формальдегида $K_{\text{ф}}$, избирательности S от высоты ввода дополнительного количества воздуха $G_{\text{доп}} = 0,1 G_{O_2}$: \blacklozenge – $K_{\text{общ}}$; \blacktriangle – $K_{\text{ф}}$; \blacksquare – S

Таким образом, методом вычислительного эксперимента на математической модели и опытным путем на лабораторной установке показано, что введение в слой катализатора дополнительного потока воздуха, распределенного по сечению слоя, с количеством кислорода 0–10 % от количества кислорода основного потока воздуха позволяет варьировать состав формалина в пределах: по метанолу 0,7–3,7 %, по формальдегиду 37–39 %. При этом появляется возможность увеличить общую конверсию и выход формальдегида на 3–5 %. Селективность (избирательность) образования формальдегида при подаче дополнительного воздуха не уменьшилась (осталась практически постоянной) и составила 92 %. Максимальный выход формальдегида наблюдается при вводе дополнительного воздуха в контактный слой на уровне 2/3 высоты слоя от места ввода реакционной смеси. Совпадение результатов вычислительного и лабораторного экспериментов при воспроизводимости последнего позволяет заключить, что использованная модель адекватна исследуемому процессу, а полученные закономерности

сти для серебряного катализатора не зависят от масштаба аппарата и могут быть использованы для совершенствования промышленных процессов синтеза формальдегида. Повышение конверсии метанола до 98 % при неизменной селективности образования формальдегида свидетельствует о ценности предложенного способа синтеза формальдегида и позволяет рекомендовать его для использования на промышленных агрегатах формалина.

Построение модели контактного аппарата для цели управления путем подачи дополнительного воздуха

В работе [2] была получена модель технологического процесса получения формалина в виде зависимости выхода формальдегида R от ряда технологических параметров. Целью настоящего исследования явилось построение модели синтеза формальдегида в виде зависимости

$$R = f(G_{\text{доп}}; G_{\text{доп}}/G_{\text{в}}), \quad (5)$$

где $G_{\text{доп}}$ – расход дополнительного потока воздуха, м³/с; $G_{\text{доп}}/G_{\text{в}}$ – соотношение расходов дополнительного и основного потоков воздуха.

Модель находим в виде уравнения регрессии, для этого выполняем следующее.

1. Оба фактора X_i , $i = 1, 2$ в выражении (5) нормируем: x_1 в диапазоне $\pm 90\%$ (± 1) от значения $x_1(0)$, x_2 в диапазоне $\pm 10\%$ (± 1) от значения $x_2(0)$:

$$\begin{cases} x_1(-1) = x_1(0) \cdot 0,1; \\ x_1(+1) = x_1(0) \cdot 1,9; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_2(-1) = x_2(0) \cdot 0,9; \\ x_2(+1) = x_2(0) \cdot 1,1; \end{cases} \quad (7)$$

где $x_1(0) = 0,01365353$ м³/с; $x_2(0) = 0,055$.

2. Формируем матрицу эксперимента (табл. 4). В случае числа факторов $n = 2$ матрица ротатабельного плана второго порядка имеет параметры: число опытов $N = 13$, число опытов в центре плана $N_0 = 5$, величина «звездного плеча» $a = 1,412$.

3. При помощи алгоритма, описанного в работе [2], на математической модели статистики контактного аппарата проводим опыты $j = \overline{1, N}$. Результаты опытов также представлены в табл. 4.

Таблица 4

Ротатабельный план второго порядка для функции $R = f(G_{\text{доп}}; G_{\text{доп}}/G_{\text{в}})$

Номер опыта N_o	X_1	X_2	Выход формальдегида $R, \%$	Температура контактного аппарата $T^{\text{к.а}}, \text{К}$
1	+1	+1	0,869	943
2	+1	-1	0,971	941
3	-1	+1	0,834	942
4	-1	-1	0,887	942
5	+1,412	0	0,859	943
6	-1,412	0	0,817	944
7	0	+1,412	0,726	946
8	0	-1,412	0,817	943
9	0	0	0,857	948
10	0	0	0,858	948
11	0	0	0,858	950
12	0	0	0,858	948
13	0	0	0,857	948

4. Проводим регрессионный анализ результатов вычислительного эксперимента. Ввиду малой значимости квадратичных членов уравнения регрессии исключаем их из модели, в результате получаем линейную модель процесса синтеза формальдегида при подаче дополнительного количества воздуха в слой катализатора:

$$R = 0,648 + 4,49 x_1 - 180 x_2, \quad \delta = 3,44 \%; \quad (8)$$

$$T^{\text{к.а}} = 945 - 0,1768 x_1 + 0,7807 x_2, \quad \delta = 0,27 \%. \quad (9)$$

Исследуем поверхность отклика функции R на максимум в области ее определения $X_i(-1) \leq X_i \leq X_i(+1)$, $i = 1, 2$ с учетом ограничений по $G_{\text{доп}}$ и $T^{\text{к.а}}$:

$$\left\{ R = R(\bar{x}) \rightarrow \max \left| \begin{array}{l} G_{\text{доп}} \leq 0,1G_{\text{в}}; \\ T^{\text{к.а}} - T_{\text{min}}^{\text{к.а}} \geq 0; \\ T^{\text{к.а}} - T_{\text{max}}^{\text{к.а}} \leq 0; \end{array} \right. \rightarrow G_{\text{доп}}^{\text{opt}}; (G_{\text{доп}} / G_{\text{в}})^{\text{opt}}. \quad (10)$$

Ограничения $G_{\text{доп}} \leq 0,1G_{\text{в}}$; $T^{\text{к.а}} - T_{\text{min}}^{\text{к.а}} \geq 0$; $T^{\text{к.а}} - T_{\text{max}}^{\text{к.а}} \leq 0$ взяты из соображений взрывобезопасности процесса и по требованиям регламента.

Исследование проводим методом линейного программирования. Исходная система ограничений:

$$\begin{cases} -a_2x_1 + a_3x_2 \geq b_1; \\ -a_2x_1 + a_3x_2 \leq b_2; \\ x_1 \leq b_3; \\ x_1 \geq b_4; \\ x_2 \leq b_5; \\ x_2 \geq b_6, \end{cases} \quad (11)$$

где x_1, x_2 – факторы в уравнениях (8), (9); $a_i, i = \overline{1,3}$ – коэффициенты в уравнениях (8), (9); $b_1 = -945 + T_{\text{max}}^{\text{к.а}}$; $b_2 = -945 + T_{\text{min}}^{\text{к.а}}$; $T_{\text{max}}^{\text{к.а}} = 710$ К и $T_{\text{min}}^{\text{к.а}} = 690$ К – крайние значения температуры контактного аппарата; $b_j, j = \overline{3,6}$ – крайнее значение факторов x_1 и x_2 в области определения R .

Из системы (11) методом искусственного базиса получаем

$$\begin{cases} x_1 = x_7 + x_{10} + b_4; \\ x_4 = b_1 + a_3x_2 + a_2x_{10}; \\ x_5 = b_2 - a_3x_2 - a_2x_7 - a_2x_{10}; \\ x_6 = b_3 - x_7 - x_{10}; \\ x_8 = b_5 - x_2; \\ x_9 = b_6 + x_2 + x_{10}. \end{cases} \quad (12)$$

Систему (12) решаем симплекс-методом Данцига:

$$R = R(x_1 = +1; x_2 = -1) = 0,912. \quad (13)$$

Таким образом, выход формальдегида достигает максимума в области определения функции R при минимальном соотношении расходов дополнительного и основного потоков воздуха $G_{\text{доп}}/G_{\text{в}}$ при максимальном расходе дополнительного потока воздуха $G_{\text{доп}}$.

Способ управления процессом контактирования подачей дополнительного количества воздуха в слой катализатора

На основе полученной модели управления (8) и с учетом результатов исследования методов управления процессом синтеза формальдегида [4–6] был разработан адаптивный способ управления процессом синтеза формальдегида [7], принципиальная схема которого изображена на рис. 5.

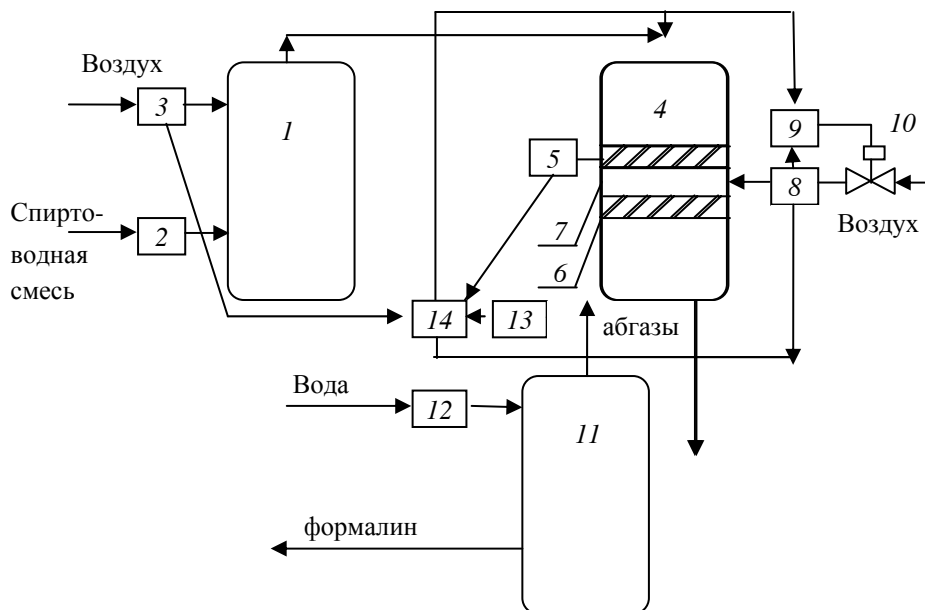


Рис. 5. Способ управления процессом синтеза формальдегида: 1 – спиртоиспаритель; 2 – датчик расхода спиртоводной смеси; 3 – датчик расхода основного потока воздуха; 4 – контактный аппарат; 5 – датчик температуры; 6 – контактный слой; 7 – устройство распределения воздуха в контактном слое; 8 – датчик расхода дополнительного потока воздуха; 9 – регулятор расхода воздуха; 10 – исполнительный механизм; 11 – абсорбер; 12 – датчик расхода воды; 13 – газоанализатор; 14 – вычислительное устройство для расчета выхода формальдегида

В спиртоиспаритель 1 подаются смесь воды и метанола и основной поток воздуха, которые контролируются датчиками 2 и 3 соответственно. Спиртоводовоздушная смесь подается в контактный аппарат 4, где на контактном слое 6 происходит синтез формальдегида. При этом температура контактного аппарата $T^{к.а}$ контролируется датчиком 5. Дополнительный поток воздуха подается в контактный слой че-

рез распределительное устройство 7 и регулируется локальной САР в составе датчика 8, регулятора 9 и исполнительного механизма 10. Прореагировавшие газы из контактного аппарата поступают в абсорбер 11, в который также поступает вода, расход которой контролируется датчиком 12. Анализ абгазов производится газоанализатором 13. Вычислительное устройство 14 рассчитывает выход следующим образом:

1) вычисляют по формуле (8) $R^{\text{зад}} = R_{\text{max}}$, откуда находят $G_{\text{доп}}^{\text{opt}}$ и $G_{\text{в}}$ ($G_{\text{в}}$ принимают за const, так как этот параметр определяет нагрузку агрегата);

2) устанавливают $G_{\text{доп}}^{\text{opt}}$ и $G_{\text{в}}$ на агрегате, по газовым анализам вычисляют $R[n]$;

3) вычисляют коэффициенты уравнения (8): с целью упрощения принимают $b_0 = \text{const}$, $b_2 = \text{const}$;

$$b_1[n] = b_1[n-1] + \frac{R[n] - R_{\text{max}}}{G_{\text{доп}}[n-1]}; \quad (14)$$

4) вычисляют $G_{\text{доп}}[n]$:

$$G_{\text{доп}}[n] = \frac{R_{\text{max}} - b_0}{b_1[n] - \frac{b_2}{G_{\text{в}}}}; \quad (15)$$

5) проверяют выполнение условия $|R_{\text{max}} - R[n]| < \epsilon$. Если условие не выполняется, то цикл повторяют с п. 2.

Предложенный способ управления процессом синтеза формальдегида позволяет увеличить выход формальдегида на 3–5 %. Кроме того, вследствие снижения температуры контактного слоя на 20–30 К увеличивается пробег катализатора [7].

Таким образом, методом вычислительного эксперимента на математической модели и опытным путем на лабораторной установке показано, что введение в слой катализатора дополнительного потока воздуха, распределенного по сечению слоя, с количеством кислорода 0–10 % относительно основного потока позволяет увеличить общую конверсию метанола и выход формальдегида на 3–5 % при неизменной селективности образования формальдегида. Совпадение результатов вычислительного и лабораторного экспериментов позволяет сделать заключение, что полученные закономерности не зависят

от масштаба аппарата и могут быть использованы для совершенствования промышленных процессов синтеза формальдегида. Методом регрессионного анализа результатов вычислительного эксперимента на математической модели статики контактного аппарата получена модель процесса синтеза формальдегида при подаче дополнительного количества воздуха в слой катализатора. С использованием метода линейного программирования проведена оптимизация процесса синтеза формальдегида. Установлено, что целевая функция – выход формальдегида достигает максимума в своей области определения при минимальном соотношении расходов дополнительного и основного потоков воздуха и максимальном расходе дополнительного потока воздуха.

Предложен способ управления процессом контактирования подачей дополнительного количества воздуха в слой катализатора, позволяющий увеличить выход формальдегида на 3–5 %, снизить температуру процесса на 20–30 К, увеличить пробег катализатора. Данный способ рекомендуется использовать совместно со способами управления процессом многоступенчатой абсорбции формальдегида и осушки воздуха [8–10].

Список литературы

1. Кондрашов С.Н. Разработка и исследование алгоритмов управления производством формалина: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1994. – 150 с.
2. Кондрашов С.Н., Савостина А.С. Моделирование узла синтеза формальдегида // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2016. – № 1. – С. 7–18.
3. Уокер Дж. Формальдегид. – М.: Госхимиздат, 1957. – 608 с.
4. 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.
5. Способ автоматического управления процессом получения формалина: пат. 2058289 Рос. Федерация / Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н., Майер В.В., Меренков В.Г., Гарейшин М.Г. – № 4769648/89; заявл. 18.12.89; опубл. 20.04.96, Бюл. № 11. – 7 с.
6. Кондрашов С.Н., Горохова М.Н. Разработка алгоритма оптимального управления технологическим процессом получения фор-

мальдегида // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2016. – № 1. – С. 19–28.

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

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

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

10. Разработка алгоритма распределенной системы управления установкой осушки воздуха УОВ-1 / С.Н. Кондрашов, А.Г. Шумихин, Н.И. Фарберов, Н.И. Берсенева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2016. – № 2. – С. 54–66.

References

1. Kondrashov S.N. Razrabotka i issledovanie algoritmov upravleniya proizvodstvom formalina [Development and research of control algorithms production duction of formalin]. Ph.D. thesis. Perm, 1994. 150 p.

2. Kondrashov S.N., Savostina A.S. Modelirovanie uzla sinteza formaldegida [Simulation of formaldehyde synthesis unit]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2016, no. 1, pp. 7–18.

3. Uoker Dzh. Formaldegid [Formaldehyde]. Moscow: Goskhimizdat, 1957. 608 p.

4. Shumikhin A.G., Kondrashov S.N., Mayer V.V. Sposob avtomaticheskogo upravleniya protsessom polucheniya formalina [A method of controlling a process producing formalin]. Patent No. 1669911 RF. 1988.

5. Shumikhin A.G., Kondrashov S.N., Mayer V.V., Merenkov V.G., Garejshin 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., Gorokhova M.N. Razrabotka algoritma optimalnogo upravleniya tekhnologicheskim protsessom polucheniya formaldegida [Development of algorithm optimal process control production of formaldehyde]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2016, no. 1, pp. 19–28.

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

8. Kondrashov S.N., Shumikhin A.G. Sposob upravleniya protsessom mnogostupenchatoy absorbtсии [A method for controlling a multi-stage absorption process]. Patent No. 2055633 RF. 1992.

9. Kondrashov S.N., Shumikhin A.G., Merenkov V.G. Sposob upravleniya protsessom mnogostupenchatoy absorbtсии [A method for controlling a multi-stage absorption process]. Patent No. 2077929 RF/ 1993.

10. Kondrashov S.N., Shumikhin A.G., Farberov N.I., Berseneva N.I. Razrabotka algoritma raspredelennoj sistemy upravleniya ustanovkoj osushki vozdukhа UOV-1 [Development of algo-rhythm distributed installation of air drying control system UOV-1]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2016, no. 2, pp. 54–66.

Получено 26.10.2016

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).

Бортникова Анна Сергеевна (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: AnyaBortnikova70@yandex.ru).

About the authors

Sergej N. Kondrashov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate professor, Department of automation of technological processes and production, Perm National Research Polytechnic University (9, Building B, Professora Pozdeeva str., Perm, 614013, e-mail: Sergej.Kondrashov@pnos.lukoil.com).

Anna S. Bortnikova (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of automation of technological processes and production, Perm National Research Polytechnic University (9, Building B, Professora Pozdeeva str., Perm, 614013, e-mail: AnyaBortnikova70@yandex.ru).