

УДК 66.011:661.525

**РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО – СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ДЛЯ РЕАКТОРА СИНТЕЗА УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ В ПЕРИОД ПУСКА**

Самойлова Ж.Г.

**DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL – STATISTICAL MODEL FOR THE REACTOR  
ACETIC ACID SYNTHESIS DURING THE COMMISSIONING PERIOD**

Samojlova Zh.G.

*В статье рассматривается реактор синтеза уксусной кислоты в период пуска в качестве объекта управления технологическим процессом производства уксусной кислоты. Были получены экспериментально - статистические модели объекта управления. В результате сравнения критериев адекватности моделей на различных этапах исследования получены модели с высокими показателями критериев адекватности.*

**Ключевые слова:** объект управления, модель, критерий адекватности.

**1. Введение.** Для управления сложными системами необходимо построить модель, которая адекватно отображает свойства объекта управления. Во многих случаях параметры такой модели определяются непосредственно в процессе эксплуатации объекта, то есть осуществляется идентификация по случайным входным и выходным сигналам.

Для решения задач оптимального управления технологическими процессами химических производств необходимо по данным, в том числе нечетким и косвенным, об объектах управления восстановить как общую картину процесса взаимодействия с определением текущих значений функциональных характеристик и режимных параметров работы агрегатов, так и значения параметров полученного продукта как функций этих величин. Для реализации перечисленных целей используют математическое описание технологических процессов, которые протекают в аппаратах.

В тех случаях, когда информации о рассматриваемом процессе недостаточно или процесс настолько сложен, что невозможно составить его детерминированную модель, а также есть возможность его экспериментального исследования, прибегают к экспериментально-статистическим методам [1]. Выбор метода экспериментального исследования объекта управления определяется: характером поставленной

задачи, условиями проведения исследования, допустимыми по технологическим требованиям, отклонениями исследуемой величины, характером эксплуатационных возмущений и др. Получить необходимый материал можно путем пассивного и активного эксперимента.

Для построения более полной модели лучше использовать активный эксперимент, который ставится по заранее составленному плану (планирование эксперимента), при этом предусматривается одновременное изменение всех параметров, влияющих на процесс, что позволяет сразу установить силу взаимодействия параметров и на этом основании сократить общее число опытов.

Однако в производственных условиях для построения моделей, позволяющих использовать адаптивное управление, реальной альтернативой активному эксперименту будет пассивный эксперимент. Он подразумевает сбор исходного статистического материала в режиме нормальной эксплуатации на промышленном объекте. В этом случае обработка опытных данных для получения математической модели проводится методами классического регрессионного и корреляционного анализа.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** Экспериментально - статистические методы широко применяются для построения математических моделей в химической промышленности [2]. В частности на Новомосковском химическом комбинате для оценки качества аммиачной селитры в процессе грануляции был реализован полный факторный эксперимент [3], а применение метода активного эксперимента для получения математического описания производства карбамида [4] позволило получить адекватную модель, описывающую действующее производство.

Соотношения, исследуемые для явлений и процессов химической технологии далеко не всегда можно выразить линейными функциями, так как при этом могут возникать неоправданно большие

ошибки. В таких случаях используют криволинейное выравнивание, когда уравнение кривой после некоторых преобразований сводится к линейной функции.

При анализе нелинейных зависимостей между признаками особое значение приобретают выбор и обоснование типа уравнения, которое наиболее полно отразит имеющуюся связь. Эта задача решается с помощью тех же приемов, которые используются при обосновании линейной зависимости. Теоретическое представление о взаимодействии показателей является главным в решении вопроса о форме кривой, которая должна применяться в том или другом случае.

В практике криволинейного выравнивания широко распространены два вида преобразований: натуральный логарифм ( $\ln$ ) и обратное преобразование ( $1/x$ ). При этом, очевидно, возможно преобразование как зависимой переменной  $y$ , так и независимой  $x$  или одновременно и той и другой.

Для построения модели надежность моделей и их параметров в большинстве случаев принимается на уровне 95% (уровень значимости  $\alpha=5\%$ )

$$\mu = \frac{|r_{yx}| \times \sqrt{n-1}}{\sqrt{1-r_{yx}^2}}$$

где  $r_{yx}$  – парный коэффициент корреляции;  $n$  – количество наблюдений;

Факторы, для которых  $\mu < 2$ , не соответствуют выбранному уровню надежности в дальнейшем регрессионном анализе не рассматриваются.

Вместе с тем следует отметить, что литературный поиск для моделирования процесса получения уксусной кислоты в производстве в момент пуска не дал существенных результатов. Поэтому необходимо провести статистический анализ характеристик объектов управления для построения адекватной экспериментально - статистической модели, описывающей процесс получения уксусной кислоты в производстве в момент пуска.

**3. Материалы и результаты исследования.** В качестве объекта для моделирования был выбран реактор синтеза уксусной кислоты в момент пуска на Северодонецком ЧАО «Азот».

На этапе анализа технологического процесса как объекта управления [5] была получена структурно-логическая схема объекта управления – реактора синтеза уксусной кислоты в период пуска, с учетом технологических параметров, показанная на рис. 2

Входными параметрами для реактора синтеза уксусной кислоты в период пуска являются: расход метанола  $F_1$ , расход оксида углерода  $F_2$ , температура метанола  $T_1$ , давление оксида углерода  $P_2$ , температура оксида углерода  $T_2$ . Выходными параметрами для реактора синтеза уксусной кислоты в период пуска являются: уровень реакционной

массы в реакторе L, давление реакционной массы в реакторе P, температура реакционной массы в реакторе T, концентрация уксусной кислоты на выходе реактора Q.

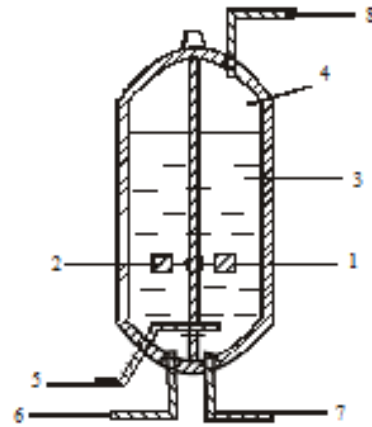


Рис. 1. Схема реактора синтеза уксусной кислоты в период пуска: 1 – корпус реактора, 2 – мешалка внутри реактора, 3 – реакционная масса, 4 – отдувочные газы, 5 – подвод оксида углерода в реактор, 6 – подвод метанола в реактор, 7 – отвод уксусной кислоты из реактора, 8 – отвод отдувочных газов

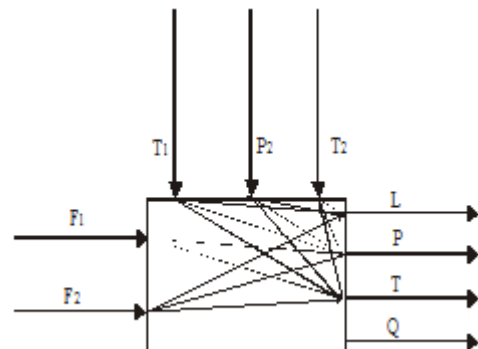


Рис. 2. Структурно-логическая схема реактора синтеза уксусной кислоты в период пуска

температура метанола  $T_1$ , давление оксида углерода  $P_2$ , температура оксида углерода  $T_2$ . определяются предыдущими стадиями. Для рассматриваемой стадии они являются возмущающими воздействиями. Переменные, с помощью которых можно воздействовать на объект с целью управления, составляют вектор регулирующих величин.

Выходными величинами являются: уровень реакционной массы в реакторе L, давление реакционной массы в реакторе P, температура реакционной массы в реакторе T.

Для получения экспериментально - статистической модели был собран статистический материал в режиме пуска на промышленном объекте.

Исследуемые объекты – реактор уксусной кислоты в период пуска. В ходе работы анализировались результаты 49 измерений по 9

параметрам, и для удобства были приняты следующие обозначения:

— для входных переменных и параметров состояния:

$X_1$  – массовый расход метанола, кг/ч;  
 $X_2$  – массовый расход оксида углерода, кг/ч;  
 $X_3$  – температура метанола, °С,  
 $X_4$  – давление оксида углерода, МПа,  
 $X_5$  – температура оксида углерода, °С,

— для выходных переменных:

$Y_1$  – уровень реакционной массы в реакторе, %,  
 $Y_2$  – давление реакционной массы в реакторе, МПа,  
 $Y_{3i}$  – температура реакционной массы в реакторе, °С.

Подача метанола и оксида углерода в реактор синтеза автоматически регулируется по массовым потокам в соотношении 1:1. Так как между расходом метанола и расходом оксида углерода существует прямая зависимость, то в исследовании целесообразно оценивать только оба входных параметра.

**На основе полученных экспериментальных данных ставилась задача:**

1. Провести многофакторный корреляционно-регрессионный анализ для получения наилучших зависимостей для оценки выходных величин для реактора синтеза уксусной кислоты в период пуска.
2. Для параметров, статистическое описание которых гарантирует заданную надежность, выполнить однофакторный регрессионный анализ.

Для безопасного ведения технологического процесса уровень реакционной массы в реакторе  $L$ , давление реакционной массы в реакторе  $P$ , температура реакционной массы в реакторе  $T$  являются важными факторами, которые должны контролироваться. Анализ технологического процесса [5] показывает, что уровень реакционной массы в реакторе  $L$ , давление реакционной массы в реакторе  $P$ , температура реакционной массы в реакторе  $T$  существенно зависят от других входных параметров, таких расход метанола  $F_1$ , расход оксида углерода  $F_2$ , температура метанола  $T_1$ , давление оксида углерода  $P_2$ , температура оксида углерода  $T_2$ . Поэтому необходимо:

На каждом этапе исследований сравнить полученные зависимости для реактора синтеза уксусной кислоты в период пуска.

В данной работе кроме анализа линейной зависимости ставилась задача рассмотреть основанные на логарифмировании и обратном преобразовании семь возможных криволинейных зависимостей, полученных комбинацией из индивидуальных преобразований зависимой переменной и независимых переменных: степенная, экспоненциальная, гиперболическая модель I и II

типа, логарифмическая,  $S$  – образная и обратнологарифмическая модели.

Линеаризацию каждой кривой необходимо выполнить на одном и том же наборе данных, чтобы затем, сравнив по абсолютной величине значения коэффициентов корреляции, детерминации и дисперсию адекватности выбрать то преобразование, которому соответствует наиболее сильная линейная зависимость.

**На первом этапе** были получены результаты для трех зависимостей.

Была рассмотрена зависимость уровня реакционной массы в реакторе синтеза уксусной кислоты в период пуска от массового расхода метанола, массового расхода оксида углерода, температуры метанола. Проведенный анализ показал, что модель, соответствующая по типу выбранной наилучшей зависимости – гиперболическая кривая 2 типа. Для реактора массовый расход оксида углерода и температура метанола являются влияющими на выходной параметр. Значимость коэффициентов детерминации и корреляции самая лучшая в модели для гиперболической кривой 2 типа, а также дисперсия адекватности, а значит и отклонение расчетных значений выходной величины от реальных значений. Наряду с моделью гиперболической кривой 2 типа хорошо описывает зависимость уровня реакционной массы в реакторе синтеза уксусной кислоты в период пуска от массового расхода метанола, массового расхода оксида углерода, температуры метанола степенная и логарифмическая модели.

При исследовании зависимости давления реакционной массы в реакторе на выходе от входных параметров массового расхода метанола, массового расхода оксида углерода, давления оксида углерода получены следующие результаты. Модели, построенные для оценки давления реакционной массы в реакторе на выходе имеют наилучшие параметры по типу зависимости: гиперболическая модель II типа. Что касается наличия факторов, влияющих на выходной параметр, то имеется значительное отличие по количеству значимых факторов, включенных в модели. Значимость коэффициентов детерминации и корреляции немного лучше в модели для зависимости уровня реакционной массы в реакторе синтеза уксусной кислоты, а дисперсия адекватности, а значит и отклонение расчетных значений выходной величины от реальных значений также ниже в модели для зависимости давления реакционной массы в реакторе. Таким образом, модель для зависимости давления реакционной массы в реакторе более адекватная, хотя критерии адекватности достаточно низкие.

Также исследовалась зависимость температуры реакционной массы в реакторе от входных параметров. Модель, построенная для оценки зависимости температуры реакционной массы в

реакторе по типу выбранных наилучших зависимостей: степенная, имеет несколько входных параметров, влияющих на выходной параметр:  $X_2$ ,  $X_3$  и  $X_5$ . Значимость коэффициентов детерминации и корреляции немного лучше в данной модели для зависимости температуры реакционной массы в реакторе, а дисперсия адекватности, а значит и отклонение расчетных значений выходной величины от реальных значений значительно ниже, чем в модели для зависимости давления реакционной массы в реакторе. Следовательно, модель для зависимость температуры реакционной массы в реакторе более адекватная, имеет большее количество значимых факторов в модели, хотя критерии адекватности достаточно низкие.

Результаты многофакторного анализа зависимостей представлены в табл. 1.

**На втором этапе исследований**, исходя из выводов, полученных на предыдущем этапе, были найдены параметры, статистическое описание которых гарантирует выбранную надежность модели. Для этих параметров был выполнен однофакторный регрессионный анализ и получены результаты для шести зависимостей.

Исследовалась зависимость уровня реакционной массы в реакторе синтеза уксусной кислоты в период пуска от массового расхода метанола, массового расхода оксида углерода, температуры метанола. Проведенный анализ показал, что модель, соответствующая зависимости уровня реакционной массы в реакторе синтеза уксусной кислоты в период пуска от массового расхода метанола по типу выбранной наилучшей зависимости -линейная, а для массового расхода оксида углерода - степенная, простая экспоненциальная кривая, для температуры метанола- s-образная кривая. Таким образом

исследование данной зависимости для массового расхода метанола, массового расхода оксида углерода даёт одинаковые значимые коэффициенты детерминации, корреляции и дисперсия адекватности и разное значение относительной погрешности, что говорит о возможности их применения для прогнозирующего управления. Исследование зависимости для температуры подаваемого метанола показало, что значимость коэффициентов детерминации и корреляции достаточно низкая, что делает невозможным построить адекватную модель, соответствующую этой зависимости.

Была рассмотрена зависимость давления реакционной массы в реакторе на выходе от входных параметров массового расхода метанола, давления оксида углерода получены следующие результаты. Модель, построенная для оценки зависимости давления реакционной массы в реакторе от массового расхода метанола имеет сходство по типу выбранной наилучшей зависимости- простая экспоненциальная кривая с моделью, построенной для зависимости давления реакционной массы в реакторе от давления оксида углерода. Помимо вышеописанных моделей приемлемыми для зависимости давления реакционной массы в реакторе от массового расхода метанола является гиперболическая кривая 2 типа, а для зависимости давления реакционной массы в реакторе от давления оксида углерода приемлемой является линейная модель. Таким образом, модели для зависимости давления реакционной массы в реакторе на выходе от входных параметров массового расхода метанола, давления оксида углерода адекватные, хотя критерии адекватности достаточно низкие.

Т а б л и ц а 1

Результаты многофакторного анализа зависимостей

	Тип модели	Количество значимых факторов	Критерии адекватности
$Y_1$	Гиперболическая кривая 2 типа	2 ( $X_2, X_3$ )	$R=0,68$ $\sigma_{ad}^2 = 1,356$ Относит.погр.=0,018
$Y_1$	Степенная, обратногологарифмическая	3 ( $X_1, X_2, X_3$ )	$R=0,59$ $\sigma_{ad}^2 = 1,322$ Относит.погр.= 0,017
$Y_2$	Гиперболическая кривая 2 типа	2 ( $X_1, X_4$ )	$R=0,57$ $\sigma_{ad}^2 = 0,0009$ Относит.погр.=3,31E-05
$Y_3$	Степенная	3 ( $X_2, X_3, X_5$ )	$R=0,76$ $\sigma_{ad}^2 = 0,174$ Относит.погр.= 0,0009

Исследовалась зависимость температуры реакционной массы в реакторе синтеза уксусной кислоты в период пуска от массового расхода метанола, массового расхода оксида углерода, температуры метанола и температуры подаваемого оксида углерода. Проведенный анализ показал, что модель, соответствующая зависимости температуры реакционной массы в реакторе синтеза уксусной кислоты в период пуска от массового расхода метанола и массового расхода оксида углерода по типу выбранной наилучшей зависимости - Гиперболическая кривая 1 типа, для температуры метанола-линейная, а для температуры оксида углерода - степенная, простая экспоненциальная кривая, для температуры метанола- линейная, простая экспоненциальная кривая. Таким образом исследование данной зависимости для массового расхода метанола, массового расхода оксида углерода даёт одинаковые значимые коэффициенты детерминации, корреляции и дисперсия адекватности и разное значение относительной погрешности, что говорит о возможности их применения для прогнозирующего управления. Исследование зависимости для температуры подаваемого метанола и температуры оксида углерода показало, что значимость коэффициентов детерминации и корреляции достаточно низкая, что делает невозможным построить адекватную модель, соответствующую этой зависимости.

Это позволяет сделать вывод, что исследование данных зависимостей для реактора синтеза уксусной кислоты в период пуска говорит о возможности применения их для различных однотипных объектов. Однако критерии адекватности не позволяют утверждать, что все полученные модели достаточно точно описывают данный процесс, а значит, не все модели пригодны для прогнозирования.

Результаты однофакторного анализа зависимостей представлены в табл. 2.

**4. Выводы.** По итогам исследования установлено, что не все рассматриваемые входные параметры имеют сильную корреляцию с выходными параметрами, учитывая выбранный уровень надежности модели. Таким образом, часть информации, полученной экспериментально, оказалась недоступной для анализа классическими статистическими методами.

По итогам оценки надежности и значимости полученных моделей, можно сделать вывод: чем больше факторов, признанных значимыми, участвуют в модели, тем выше значимость критериев адекватности. Недостаточно значимые показатели для оценки адекватности моделей могут быть объяснены наличием в исследуемом процессе неучтенных факторов и случайных возмущений, которые не вошли в уравнения регрессии.

Таблица 2

Результаты однофакторного анализа зависимостей

		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
Y <sub>1</sub>	Тип модели	линейная	Степенная, Простая экспоненциальная кривая	s-образная кривая		
	Критерии адекватности	R=0,52 $\sigma_{ad}^2 = 1,725$ Относит.погр.= =0,023	R=0,52 $\sigma_{ad}^2 = 1,587$ Относит.погр.= 0,021	R=0,29 $\sigma_{ad}^2 = 1,817$ Относит.погр.= =0,024		
Y <sub>2</sub>	Тип модели	Простая экспоненциальная кривая, гиперболическая кривая 2 типа			Линейная, простая экспоненциальная кривая	
	Критерии адекватности	R=0,34 $\sigma_{ad}^2 = 0,001$ Относит.погр.= =4,21E-05			R=0,34 $\sigma_{ad}^2 = 0,001$ Относит.погр.= =4,21E-05	
Y <sub>3</sub>	Тип модели	Гиперболическая кривая 1 типа	Гиперболическая кривая 1 типа	линейная		Линейная, Простая экспоненциальная кривая
	Критерии адекватности	R=0,66 $\sigma_{ad}^2 = 0,226$ Относит.погр.= =0,001	R=0,69 $\sigma_{ad}^2 = 0,213$ Относит.погр.= 0,001	R=0,32 $\sigma_{ad}^2 = 0,362$ Относит.погр.= =0,002		R=0,30 $\sigma_{ad}^2 = 0,367$ Относит.погр.= =0,002

В результате сравнения критериев адекватности моделей на различных этапах исследования получены модели с высокими показателями критериев адекватности:

- для зависимости уровня реакционной массы в реакторе синтеза уксусной кислоты в период пуска от массового расхода оксида углерода, температуры метанола. получена модель гиперболическая кривая 2 типа:

$$Y_1 = \frac{10^6}{\sum_{i=1}^2 k_i \cdot Z_i + 16403}$$

где:  $Z_1 = X_2$ ;  $Z_2 = X_3$ ;

$$k_1 = -29; k_2 = -2,5.$$

- для зависимости давления реакционной массы в реакторе на выходе от входных параметров массового расхода метанола, давления оксида углерода получена гиперболическая модель 2 типа:

$$Y_2 = \frac{10^6}{\sum_{i=1}^2 k_i \cdot Z_i + 39047}$$

где:  $Z_1 = X_1$ ;  $Z_2 = X_4$ ;

$$k_1 = -0,4; k_2 = -95;$$

- для зависимости температуры реакционной массы в реакторе от массового расхода оксида углерода, температуры метанола и температуры оксида углерода:

$$Y_3 = 114,0758 \cdot \prod_{i=1}^3 Z_i^{k_i},$$

где:  $Z_1 = X_2$ ;  $Z_2 = X_3$ ;  $Z_3 = X_5$ ;

$$k_1 = 0,045687; k_2 = -0,0045; k_3 = 0,026812.$$

При проверке адекватности полученных моделей на других экспериментально-статистических данных, для всех зависимостей относительная погрешность результатов не превысила 1,8 %, что подтверждает значимость полученных моделей и возможность их применения для прогнозирующего управления.

Необходимо отметить, что полученное экспериментально - статистическими методами математическое описание объекта невозможно применить к другим однотипным объектам.

Поэтому в процессе управления модель, на основе которой обеспечивается оптимальное адаптивное управление объекта необходимо строить или уточнять для каждого реактора с

использованием как статистических данных, так и другой информации.

Исходя из этого, нужно подобрать такой тип модели объекта, который позволил бы учитывать неконтролируемые возмущения, интервальный характер задания многих параметров и информацию об особенностях процесса в конкретном реакторе синтеза уксусной кислоты. Примером таких моделей могут быть комбинированные модели с элементами нечеткой логики.

#### Л и т е р а т у р а

1. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / Кафаров В. В. – М. : Химия, 1985. – 448 с.
2. Солодовников В. В. Статистический анализ объектов регулирования / В. В. Солодовников, А. С. Усков – М. : Машгиз, 1966. – 131 с.
3. Планирование промышленного эксперимента в цехе аммиачной селитры/ [Вольберг А.А., Широков С.Г., Адлер Ю.П. и др. ] - Химическая промышленность, 1976. – 33 с.
4. Кондратьев В. В. Применение метода активного эксперимента для получения математического описания производства карбамида / В. В. Кондратьев, Р. Я. Шебакпольская - Азотная промышленность, 1968.- № 3. – 65с.
5. Поркуян О. В. Проблемы и задачи оптимального управления процессом нейтрализации в производстве аммиачной селитры в условиях неопределенности / О. В. Поркуян, Е. И. Проказа - Вісник СНУ, 2009. - № 18. –178 с.
6. Производство аммиачной селитры в агрегатах большой единичной мощности / [Иванов М. Е., Олевский В. М., Поляков Н. Н. и др.] – М. : Химия, 1990. – 228 с.

#### R e f e r e n c e s

1. Kafarov V. V. Metodi kibernetiki v himiji i himicheskoj tehnologii / Kafarov V. V. – М. : Himija, 1985. – 448 s.
2. Solodovnikov V. V. Statisticheskij analiz ob'ektov regulirovanija / V. V. Solodovnikov, A. S. Uskov – М. : Maschiz, 1966. – 131 s.
3. Planirovanije promischlennogo experimenta v cehe ammiachnoj selitri/ [ Volberg A. A., Schirokov S. G., Adler Ju. P. i dr. ] - Himicheskaja promischlennost - 1976. – 33 s.
4. Kondratjev V. V. Primenenije metoda aktivnogo experimenta dlja poluchenija matematicheskogo opisanija proizvodstva karbamida / V. V. Kondratjev, R. Ja. Shebakpolskaja - Asotnaja promishclennoct – 1968 - № 3. – 65 s.
5. Porkujan O. V. Problemi I sadachi optimalnogo upravlenija procesom nejtralizaciji v proizvodstve ammiachnoj selitri v uslovijah neopredelennosti / O. V. Porkujan, E. I. Prokaza - Vestnik SNU - 2009. - № 18. – 178 s.
6. Proizvodstvo ammiachnoj selitri v agregatah bolshcoj edinichnoj moschnosti / [ Ivanov M. E., Olevskij V. M., Poljakov N. N. i dr. ] – М. : Himija - 1990. – 228 s.

**Самойлова Ж. Г. Розробка експериментально-статистичних моделей для реактора синтезу оцтової кислоти в період пуску**

*У статті розглядається реактор синтезу оцтової кислоти в період пуску як об'єкт управління технологічним процесом виробництва оцтової кислоти. Були отримані експериментально - статистичні моделі об'єкту управління. В результаті порівняння критеріїв адекватності моделей на різних етапах дослідження отримані моделі з високими показниками критеріїв адекватності.*

**Ключові слова:** об'єкт управління, модель, критерій адекватності.

**Samojlova Zh. G. Development of an experimental - statistical model for the reactor acetic acid synthesis during the commissioning period.**

*The article discusses the acetic acid synthesis reactor during start-up as the object of the process control of production of acetic acid. The experimentally statistical models of control object have been obtained. The models with high rates adequacy criteria have been obtained on the base of comparison of adequacy models of criteria at different research stages.*

**Keywords:** control object, model, adequacy criteria.

**Самойлова Жанна Георгіївна** – к.т.н., доцент, доцент кафедри електронних апаратів, Технологічний інститут Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк), [en000935@mail.ru](mailto:en000935@mail.ru)

*Рецензент:* **Суворін О. В.** – д.т.н., доцент

Стаття подана 05.12.2014