

# ТАДҚИҚОТ ВА ИННОВАЦИЯЛАР ЖУРНАЛИ

ЖУРНАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИННОВАЦИИ | JOURNAL OF RESEARCH AND INNOVATIONS

**ИСМАИЛОВ Ойбек Юлибоевич**

*Ведущий научный сотрудник лаборатории  
«Процессы и аппараты химической технологии»  
Института общей и неорганической химии АН РУз,  
д.т.н., проф. (DSc)*

**ЮСУПОВ Рустам Атхамович**

*Начальник Управления Комитета промышленной,  
Радиационной и ядерной безопасности при  
Кабинете Министров по Ташкентской области,  
д.ф.т.н. (PhD)*

**ИСАМАТОВА Джамиля Нигматуллаевна**

*Ташкентский химико-технологический институт  
начальник научного отдела, д.ф.т.н. (PhD)  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.14014651>*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ

### АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследования корреляционных или регрессионных связей между входными и выходными параметрами объекта, в системе эмпирических зависимостей, полученных путем статистической проверки математического описания объекта.

Для рассматриваемого объекта были определены входные и выходные параметры процесса. Полученное уравнение в результатах расчета оказалось адекватным. Оптимизация — это процедура определения оптимального, то есть оптимальных условий для реализации того или иного технологического процесса. Оптимизация рассматривается как математическая задача поиска экстремумов многомерных функций.

**Ключевые слова:** уравнение регрессии, моделирование, технологический процесс, эмпирическая модель, корреляция, пассивный эксперимент, матрица, критерий Стьюдента, критерий Фишера, оптимизация.

## КОНДЕНСАЦИЯ ЖАРАЁНЛАРНИ МОДЕЛЛАШТИРИШ ВА ОПТИМАЛЛАШТИРИШ

### АННОТАЦИЯ

Мақолада объектнинг математик тавсифи статистик текшириш натижасида олинган эмпирик боғлиқликлар тизими ҳамда, объектнинг кириш ва чиқиш параметрлари ўртасидаги корреляция ёки регрессия муносабатларини ўрганиш натижалари келтирилган.

Кўрилаётган объект учун жараённинг кириш ва чиқиш параметрлари аниқланди. Ҳисоб китоб натижаларида ҳосил бўлган тенглама адекватлиги исботланди. Оптималлаштириш - бу технологик жараённи амалга оширишнинг энг мақбул, яъни оптимал шароитларини аниқлаш процедурасидир. Оптималлаштириш кўп ўзгарувчи функциялар экстремумларини кидиришнинг математик масаласи каби қаралади.

**Калит сўзлар:** регрессия тенгламасини, моделлаштириш, технологик жараён, эмпирик модел, корреляция, пассив эксперимент, матрица, Стьюдент критерия, Фишер мезони, оптималлаштириш.

## SIMULATION AND OPTIMIZATION OF THE CONDENSATION PROCESS

### ANNOTATION

The article presents the results of a study of correlation or regression relationships between the input and output parameters of an object, in a system of empirical dependencies obtained by statistical verification of the mathematical description of the object. The input and output parameters of the process were determined for the object under consideration. The resulting equation in the calculation results turned out to be adequate. Optimization is a procedure for determining the optimal, that is, the optimal conditions for the implementation of a particular technological process. Optimization is considered as a mathematical problem of finding the extremes of multidimensional functions.

**Keywords:** regression equation, modeling, technological process, empirical model, correlation, passive experiment, matrix, Student's criterion, Fisher's criterion, optimization..

Технологик жараёнларни моделлаштиришда физик-кимёвий қонуниятларни ва моделларнинг мувофиқлигини текшириш учун экспериментал маълумотларни билиш талаб этилади. Бунда эмпирик моделлар экспериментал-статистик усуллар ёрдамида ишлаб чиқилади ва объектда содир бўладиган жараёнлар билан тизимнинг кириш параметрларининг ўзгаришига таъсирининг боғлиқлиги ўрганилади [1, 2].

Бундай ҳолатда объектнинг математик тавсифи статистик текшириш натижасида олинган эмпирик боғлиқликлар тизими ҳамда, объектнинг кириш ва чиқиш параметрлари ўртасидаги корреляция ёки регрессия муносабатлари кўринишига эга бўлади.

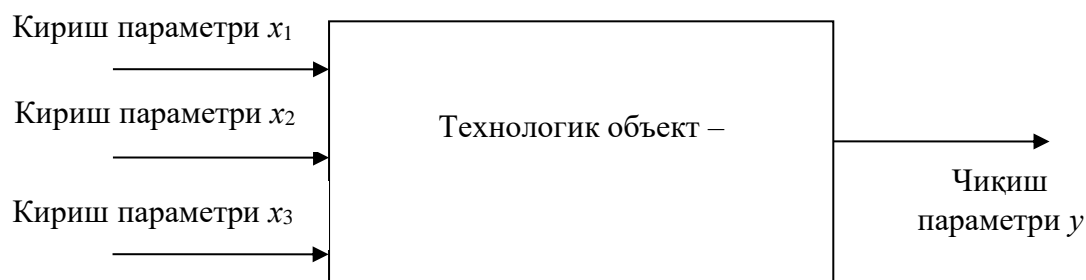
Агар моделлаштирилаётган объект етарли даражада ўрганилмаган бўлса ва детерминлашган моделни тузиш имконияти бўлмаса, унда жараённинг математик модели экспериментал статик моделлаштириш усули билан тузилади. Бунда статистик материал актив ёки пассив эксперимент қўйиш усули билан тўпланади.

*1- жалвал*

*Режалаштиришнинг характеристикалари*

Омилларнинг номланиши	Ўлчов бирилиги	Белгиланиши	Факторлар даражаси		
			+1	-1	0
Тўйинган буғлар сарфи	м <sup>3</sup> /с	$x_1$	0,022	0,014	0,018
Буғнинг босими	КПа	$x_2$	270	230	250
Бошлангич ҳарорат	°С	$x_3$	130	110	120

Кўрилаётган объект учун жараённинг кириш ва чиқиш параметрлари аниқланди. Ҳар бир факторнинг ўзгариш оралиғини қиймати, биринчи навбатда,



1-расм. Фаол тажрибага асосланган статистик моделлар

Кўрилатган жараён учун режалаштириш матричасини тузамиз. Режалаштириш матричасидаги тажрибалар сони  $N = 2^3 = 8$  га тенг.

2-жадвал

Режалаштириш матричаси

№	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$Y$
1	0,014	230	110	$Y_1$
2	0,022	230	110	$Y_2$
3	0,014	270	110	$Y_3$
4	0,022	270	110	$Y_4$
5	0,014	230	130	$Y_5$
6	0,022	230	130	$Y_6$
7	0,014	270	130	$Y_7$
8	0,022	270	130	$Y_8$

Режалаштириш матричаси экспериментни маълум бир режа бўйича ўтказиш, ҳар бир экспериментда чиқиш параметрининг қийматларини аниқлаш ва экспериментал маълумотлар асосида статистик моделни куриш учун тузилган [3].

Экспериментни режалаштиришда математик модел куйидаги кўринишда олинади:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n.$$

(1)

3- жадвал

Тўлиқ факторли эксперимент  $2^3$

Тажриба рақами	Натурал масштабдаги факторлар			Ўлчамсиз масштабдаги факторлар			
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$
1	0,014	230	110	-1	-1	-1	56
2	0,022	230	110	+1	-1	-1	58
3	0,014	270	110	-1	+1	-1	61
4	0,022	270	110	+1	+1	-1	64
5	0,014	230	130	-1	-1	+1	60
6	0,022	230	130	+1	-1	+1	65
7	0,014	270	130	-1	+1	+1	63
8	0,022	270	130	+1	+1	+1	66

4- жалвал

## Фиктив ўзгарувчили режалаштириш матрицаси

Тажриба рақами	Ўлчамсиз масштабдаги факторлар				
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$
1	+1	-1	-1	-1	$y_1$
2	+1	+1	-1	-1	$y_2$
3	+1	-1	+1	-1	$y_3$
4	+1	+1	+1	-1	$y_4$
5	+1	-1	-1	+1	$y_5$
6	+1	+1	-1	+1	$y_6$
7	+1	-1	+1	+1	$y_7$
8	+1	+1	+1	+1	$y_8$

$b_j$  регрессия тенгласининг ҳар қандай коэффиценти  $y$  устуни ва мос  $x_j$  устунининг скаляр маҳсулоти билан аниқланиб,  $N$  режалаштириш матрицасидаги тажрибалар сонига бўлинади [4]:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i \quad (2)$$

2-жалвалдаги режалаштиришдан фойдаланиб, дастлаб чизикли регрессия тенгламалари коэффицентини ҳисоблаймиз [5]:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (3)$$

$x_1$  да  $b_1$  коэффицентини ҳисоблаш учун кўпайтмаларни йиғиндисини ҳисоблаш зарур:

$$b_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ +1 \\ +1 \\ +1 \\ +1 \\ +1 \\ +1 \\ +1 \\ +1 \\ +1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y \\ 56 \\ 58 \\ 61 \\ 64 \\ 60 \\ 65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 56 \\ 58 \\ 61 \\ 64 \\ 60 \\ 65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix}$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ -1 \\ +1 \\ -1 \\ +1 \\ -1 \\ +1 \\ -1 \\ +1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y \\ 56 \\ 58 \\ 61 \\ 64 \\ 60 \\ 65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -56 \\ 58 \\ -61 \\ 64 \\ -60 \\ 65 \\ -63 \\ 66 \end{bmatrix}$$

$$\sum_{i=1}^8 x_{0i} y_i = 493 \quad \sum_{i=1}^8 x_{1i} y_i = 13$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^8 x_{0i} y_i}{8} = 61,62, \quad b_1 = \frac{\sum_{i=1}^8 x_{1i} y_i}{8} = 1,625$$

$$b_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ -1 \\ -1 \\ +1 \\ +1 \\ -1 \\ -1 \\ +1 \\ +1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y \\ 56 \\ 58 \\ 61 \\ 64 \\ 60 \\ 65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -56 \\ -58 \\ 61 \\ 64 \\ -60 \\ -65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix}$$

$$b_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ +1 \\ +1 \\ +1 \\ +1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y \\ 56 \\ 58 \\ 61 \\ 64 \\ 60 \\ 65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -56 \\ -58 \\ -61 \\ -64 \\ 60 \\ 65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix}$$

$$\sum_{i=1}^8 x_{1i} y_i = 15 \qquad \sum_{i=1}^8 x_{1i} y_i = 15$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^8 x_{0i} y_i}{8} = 1,875; \qquad b_3 = \frac{\sum_{i=1}^8 x_{0i} y_i}{8} = 1,875$$

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (4)$$

Агар ўзаро таъсир коэффитциентларини ҳисобга олган ҳолда тўлиқроқ регрессия тенгнамасини киритсак,  $b_{12}, b_{13}, b_{23}$  (жуфтлик ўзаро таъсир эффекти) ва  $b_{123}$  (учлик ўзаро таъсир эффекти) коэффицентларини аниқлаш учун матрицани кенгайтириш керак (4-жадвал) ва у қуйидагича баён қилинади (5-жадвал) :

5- жадвал

Матрица кенгайтмаси

Тажриба рақами	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	$y$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	56
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	58
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	61
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	64
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	60
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	65
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	63
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	66

Ўзаро таъсирлар чизикли эффектларга ўхшаш тарзда аниқланади. Шундай қилиб,  $b_{12}$  коэффитциентини аниқлаш учун қуйидагилар зарур [6]:

$$b_{12} = \begin{bmatrix} x_1 x_2 \\ +1 \\ -1 \\ -1 \\ +1 \\ +1 \\ -1 \\ -1 \\ +1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y \\ 56 \\ 58 \\ 61 \\ 64 \\ 60 \\ 65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 56 \\ -58 \\ -61 \\ 64 \\ 60 \\ -65 \\ -63 \\ 66 \end{bmatrix}$$

$$\sum_{i=1}^8 x_{1i} y_i = -1$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^8 x_{0i} y_i}{8} = -0,125;$$

$$b_{13} = \begin{bmatrix} x_1 x_3 \\ +1 \\ -1 \\ +1 \\ -1 \\ -1 \\ +1 \\ -1 \\ +1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y \\ 56 \\ 58 \\ 61 \\ 64 \\ 60 \\ 65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 56 \\ -58 \\ 61 \\ -64 \\ -60 \\ 65 \\ -63 \\ 66 \end{bmatrix}$$

$$\sum_{i=1}^8 x_{1i} y_i = 3$$

$$b_{13} = \frac{\sum_{i=1}^8 x_{0i} y_i}{8} = 0,375$$

$$b_{23} = \begin{bmatrix} x_2 x_3 \\ +1 \\ +1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ +1 \\ +1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y \\ 56 \\ 58 \\ 61 \\ 64 \\ 60 \\ 65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 56 \\ 58 \\ -61 \\ -64 \\ -60 \\ -65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix}$$

$$\sum_{i=1}^8 x_{1i} y_i = -7$$

$$b_{23} = \frac{\sum_{i=1}^8 x_{0i} y_i}{8} = -0,8725;$$

$$b_{123} = \begin{bmatrix} x_1 x_2 x_3 \\ -1 \\ +1 \\ +1 \\ -1 \\ +1 \\ -1 \\ -1 \\ +1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y \\ 56 \\ 58 \\ 61 \\ 64 \\ 60 \\ 65 \\ 63 \\ 66 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -56 \\ 58 \\ 61 \\ -64 \\ 60 \\ -65 \\ -63 \\ 66 \end{bmatrix}$$

$$\sum_{i=1}^8 x_{1i} y_i = -3$$

$$b_{123} = \frac{\sum_{i=1}^8 x_{0i} y_i}{8} = -0,3725$$

Агар қўшимча равишда параллел тажрибалар қўйсақ, биз  $s_{\text{очн}}^2$  ни аниқлаймиз, регрессия коэффициентларининг аҳамиятини ва эркинлик даражалари мавжуд бўлганда, тенгламанинг адекватлигини текширишимиз мумкин.

Режалаштирилган тажриба учун ковариация матрицаси

$$(X^T X)^{-1} = \begin{bmatrix} 1/N & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/N & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1/N \end{bmatrix} \quad (5)$$

диагональ матрица бўлганлиги сабабли регрессия тенгламасининг коэффицентлари бир-бири билан корреляция қилинмайди. Регрессия тенгламаси коэффицентларининг аҳамиятини ҳар бир коэффицент учун алоҳида-алоҳида Стъудент критерияси ёрдамида текшириш мумкин. Регрессия тенгламасидан (2) аҳамиятсиз коэффицентни чиқариб ташлаш қолган коэффицентларга таъсир қилмайди. Ковариация матричасининг диагональ элементлари бир-бирига тенг, шунинг учун (1) ва (2) тенгламаларнинг барча коэффицентлари бир хил аниқлик билан аниқланади [7]:

$$s_{b_j} = s_{\text{восп}} / \sqrt{N} \quad (6)$$

режанинг ўртасига учта қўшимча параллел тажриба қўйилди ва қуйидаги у қийматлари олинди:

$$\begin{aligned} y_1^0 &= 64; y_2^0 = 60; y_3^0 = 65; \\ \bar{y}^0 &= \frac{\sum_{u=1}^3 y_u^0}{3} = 63; \\ s_{\text{восп}}^2 &= \frac{\sum_{u=1}^3 (y_u^0 - \bar{y}^0)^2}{2} = 1; s_{\text{восп}}^0 = 1 \\ s_{b_j} &= \frac{1}{\sqrt{8}} = 0,35; \end{aligned}$$

коэффицентларнинг аҳамиятини Стъудент мезонига кўра баҳолаймиз [141]:

$$\begin{aligned} t_0 &= \frac{|b_0|}{s_{b_0}} = \frac{61,62}{0,35} = 176; \\ t_1 &= \frac{|b_1|}{s_{b_1}} = \frac{1,625}{0,35} = 4,64; \\ t_2 &= \frac{|b_2|}{s_{b_2}} = \frac{1,875}{0,35} = 5,36; \\ t_3 &= \frac{|b_3|}{s_{b_3}} = \frac{1,875}{0,35} = 5,36; \\ t_{12} &= \frac{|b_{12}|}{s_{b_{12}}} = \frac{-0,125}{0,35} = -0,36; \end{aligned}$$

$$t_{13} = \frac{|b_{13}|}{s_{b_{13}}} = \frac{0,3755}{0,35} = 1,07;$$

$$t_{23} = \frac{|b_{23}|}{s_{b_{23}}} = \frac{-0,8725}{0,35} = -2,49;$$

$$t_{123} = \frac{|b_{123}|}{s_{b_{123}}} = \frac{-0,3725}{0,35} = -1,07;$$

Муҳимлик даражаси учун Стюдент критериясининг жадвал қиймати  $p=0,4$  ва эркинлик даражаси сони  $f=2$ ,  $t_p(f)=1,06$ . Шундай қилиб,  $b_3$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$  ва  $b_{123}$  коэффитциентлари аҳамиятсиз ва уларни тенгламадан олиб ташлаймиз. Тенгламадан чиқариб ташланган аҳамиятсиз коэффитциентларни олиб ташлагандан сўнг, регрессия тенграмаси куйидаги кўринишга эга бўлади [8, 9]:

$$\hat{y} = 61,62 + 1,625x_1 + 1,875x_2 + 1,875x_3$$

Олинган тенграманинг мослигини Фишер мезони бўйича текшираемиз:

$$F = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_{\text{восп}}^2};$$

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 (y_i - \hat{y}_i)}{N - l} = \frac{8}{4} = 2;$$

$$S_{\text{восп}}^2 = 5,373;$$

$l$ - регрессия тенграмасидаги муҳим коэффитсиэнтлар сони, 4 га тенг. Унда  $F = 2/5,373 = 0,372$ ;  $p = 0,4$ ,  $f_1 = 5$ ,  $f_2 = 2$ ,  $F_{1-p}(f_1, f_2) = 2,57$ ,  $F < F_{1-p}(f_1, f_2)$  учун Фишер мезонининг жадвалли қиймати. Бундан кўриниб турибдики, ҳосил бўлган тенглама адекватдир.

Оптималлаштириш - бу технологик жараённи амалга оширишнинг энг мақбул, яъни оптимал шароитларини аниқлаш процедурасидир. Оптималлаштириш кўп ўзгарувчили функциялар экстремумларини кидиришнинг математик масаласи каби қаралади.

**ИҚТИБОСЛАР. СНОСКИ. REFERENCES.**

1. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. Изд. второе, перераб. и доп. - М.: Химия, 1975. - 576 с.
2. Юсуфбеков Н.Р., Мухаммедов Б.Э., Фуломов Ш.М. Технологик жараёнларни бошқариш системалари: техника ОЎЮ учун дарслик. - Тошкент: Ўқитувчи, 1997. - 704 б.
3. Остапчук Н.В. Основы математического моделирования процессов пищевых производств: Учебное пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - К.: Выща школа, 1991. - 367 с.
4. Юсупбеков Н.Р., Мухитдинов Д.П. Технологик жараёнларни моделлаштириш ва оптималлаштириш асослари. - Т.: Фан ва технология, 2015. - 440 б.
5. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - с. 280.
6. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования экспериментов. Учебное пособие. - М.: ДеЛи Принт, 2005. - 296 с.
7. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. Изд. третье, перераб. и доп. - М.: Химия, 1976. - 464 с.
8. <https://math.semestr.ru/corel/table-fisher.php>. Распределение Фишера (F-распределение)
9. Ахназарова С.Л., Каффаров В.В. Методы оптимизация эксперимента в химической технологии: Учеб. пособия для хим.-технол. спец. вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1985. - 327 с.