

Методы планирования эксперимента в задачах моделирования и управления на примере объектов топливно-энергетического комплекса

Л.Г. Тугашова, И.П. Ситдикова, Б.Н. Латипов

Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»,
423462, г. Альметьевск, ул. Советская, 186а, Россия

Резюме. Цель. Проведение планирования эксперимента для случаев двух и трех факторов на примере объектов топливно-энергетического комплекса. **Методы.** Для повышения точности модели и учета нелинейности связи параметров применен ортогональный центральный композиционный план. **Результат.** Выполнены расчеты параметров плана, составлены матрицы планирования, получены уравнения регрессии. Реализован двухфакторный эксперимент, позволивший построить адекватные квадратичные регрессионные модели для прогнозирования расхода и давления в системе транспортировки жидкости. Проведен трехфакторный эксперимент на основе секционной модели первичной переработки нефти. Факторы, влияющие на критерий: расход перегретого водяного пара, флегмовое число, потенциальное содержание светлых фракций в сырье. Инструментами реализации выбраны программные пакеты MatLab и Python. Выполнена оценка адекватности полученных регрессионных квадратичных зависимостей исходным данным по критерию Фишера. **Вывод.** Решена задача максимизации расхода жидкости в системе транспортировки жидкости. Проведенное исследование введения воздуха в циркулирующую вязкую жидкость можно рассматривать как удобную модель для изучения двухфазных потоков. Применение статистической модели на установках ректификации нефти способствует повышению эффективности функционирования установок.

Ключевые слова: планирование эксперимента, статистическая модель, физическая модель, центральный композиционный план, нефть, расходомер, газовый фактор

Для цитирования: Л.Г. Тугашова, И.П. Ситдикова, Б.Н. Латипов. Методы планирования эксперимента в задачах моделирования и управления на примере объектов топливно-энергетического комплекса. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):154-164. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-154-164

Methods of Experimental Design in Modeling and Control Tasks Illustrated by Fuel and Energy Complex Facilities

L.G. Tugashova, I.P. Sitdikova, B.N. Latipov

Almetyevsk State Technological University «Higher School of Petroleum»,
423462, Almetyevsk, 186a Sovetskaya Street, Russia

Abstract. Objective. To carry out experimental design for two- and three-factor cases using facilities of the fuel and energy complex as examples. **Methods.** An orthogonal central composite design was applied to improve model accuracy and account for nonlinear relationships among parameters. **Results.** The design parameters were calculated, planning matrices were constructed, and regression equations were obtained. A two-factor experiment was implemented, yielding adequate quadratic regression models for predicting flow rate and pressure in a liquid-transport system. A three-factor experiment was conducted based on a sectional model of primary oil refining. The factors affecting the criterion were: superheated steam flow rate, reflux ratio, and potential content of light fractions in the feed. MatLab and Python software packages were used. The adequacy of the obtained quadratic regression relationships to the original data was evaluated by Fisher's F-test. **Conclusions.** The problem of maximizing liquid flow in the transport system was

solved. The study of air injection into a circulating viscous liquid can serve as a convenient model for two-phase flow investigation. The application of the statistical model to oil rectification units contributes to improved operational efficiency of the installations.

Keywords: experimental design, statistical model, physical model, central composite design, oil, flow meter, gas factor

For citation: L.G. Tugashova, I.P. Sitdikova, B.N. Latipov. Methods of Experimental Design in Modeling and Control Tasks Illustrated by Fuel and Energy Complex Facilities. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):154-164. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-154-164

Введение. Важной задачей при моделировании и управлении объектами топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является изучение и идентификация состава и физико-химических свойств углеводородного сырья. Из-за присутствия в сырье технологических установок асфальто-смолистых веществ, парафинов, воды, солей на поверхностях стенок аппаратов могут возникать отложения. Получить знания о составе и физико-химических свойствах углеводородного сырья можно разными способами: справочная информация, лабораторные данные, экспериментально-статистические методы, планирование эксперимента.

В справочнике [1] приведены физико-химические свойства нефтей различных месторождений. В работе [2] предложены следующие аппроксимирующие зависимости кривой истинных точек кипения (ИТК) для нефти разных месторождений: кубическая парабола, степенная функция, арктангенс, показательно-степенная функция, кубическая парабола–арктангенс. Показано, что наилучшие результаты получены для комбинированной модели «кубическая парабола–арктангенс».

Оперативная оценка показателей качества нефтепродуктов необходима для выполнения современных требований стандартов. Наряду с поточными анализаторами и лабораторным анализом применяются виртуальные анализаторы (ВА). Чаще всего ВА построены на основе многофакторных регрессионных моделей [3, 4] или методов искусственного интеллекта [5- 8]. При добыче и транспортировке нефти происходит загрязнение природной среды, в частности, при аварийных ситуациях. В работе [9] приведены результаты исследования состава и свойств нефти, а также предложена методика оценки ее потенциального воздействия на геологическую среду при аварийных разливах.

Методы математического планирования эксперимента являются основными инструментами для систематического изучения влияния множества факторов на эффективность технологических процессов. Полный факторный эксперимент (ПФЭ) позволяет оценить влияние каждого параметра при проведении серии экспериментов. Ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП) расширяет возможности моделирования за счет включения квадратичных членов в уравнение регрессии, что важно при исследовании нелинейных зависимостей вблизи оптимума. Эти подходы нашли широкое применение в оптимизации процессов очистки загрязненных объектов, разработки биотехнологических систем, а также в инженерных исследованиях, включая задачи нефтегазовой отрасли. В работе [10] методология поверхности отклика с использованием ОЦКП применена для оптимизации процесса удаления дизельного топлива из загрязненных почв методом промывки с добавлением ПАВ, усиленной аэрацией. Применение ОЦКП позволило оценить линейное влияние скорости потока воздуха, pH промывочного раствора, концентрации ПАВ (Brij 35) и скорости перемешивания на эффективность удаления дизельного топлива, а также выявить квадратичные эффекты (нелинейность отклика).

В исследовании [11] методология поверхности отклика (RSM) с использованием ОЦКП применена для изучения и оптимизации процесса очистки сточных вод нефтеперерабатывающего завода в реакторах периодического действия (SBR), как с добавлением порошкообразного активированного угля (PAC-SBR), так и без него (NPAC-SBR). Одним из двух независимых факторов, выбранных для оптимизации с помощью RSM/ОЦКП, был

тип аэрации. ОЦКП использован для разработки матрицы экспериментов, включающей комбинации различных типов аэрации и второго фактора – общего времени цикла реакции (4, 6 и 8 часов).

В работе [12] приведено применение планов второго порядка, в частности, ОЦКП Бокса, для построения и исследования моделей систем. Показан пример построения динамической модели электрической схемы в среде SimInTech для трех факторов. Приведены матрицы стандартного и ортогонального ОЦКП Бокса, формулы для расчета коэффициентов квадратичной модели по результатам эксперимента как в кодированных, так и в натуральных переменных. Результатом является получение уравнения регрессии второго порядка. В исследовании [13] для оптимизации условий культивирования алкалофильных бактерий *Raenibacillus mannanolyticus* применен метод ПФЭ, в ходе которого одновременно варьировались такие факторы, как источник углерода, его концентрация, аэрация, pH, температура и продолжительность культивирования. Уделяется внимание влиянию аэрации на синтез экзополисахарида, поскольку увеличение интенсивности перемешивания положительно сказывалось на вязкости культуральной жидкости.

В статье [14] рассматривается проблема повышения эффективности обессоливания и обезвоживания нефти, связанная с необходимостью эффективного удаления пластовой воды и солей перед транспортировкой и переработкой. Идея предлагаемой технологии заключается в том, что интенсивное диспергирование промывочной воды на мелкие капли увеличивает поверхность массообмена между водой и нефтью, что способствует более полному и быстрому извлечению солей и остаточной пластовой воды из нефтяной эмульсии. В рамках эксперимента варьировались параметры: исходное содержание солей и воды в нефти, расход промывочной воды и скорость струи промывочной воды на выходе. Физическое моделирование имеет важное значение в проведении экспериментов, научных исследований, в процессе обучения студентов.

Постановка задачи. Целью исследования является применение методов ОЦКП (случаи двухфакторного и трехфакторного эксперимента) для выявления влияния факторов на выходной параметр на примере объектов ТЭК. В первом случае эксперимент проводится на физической модели объекта, во втором – на имитационной модели.

Методы исследования. Ортогональным планом называется такой план, у которого матрица планирования X строится так, чтобы матрица $C=X_tX$ оказалась диагональной. Используем этот подход и при построении планов второго порядка. План называется центральным, если все точки расположены симметрично относительно центра плана. ОЦКП – центральный симметричный ортогональный композиционный план.

В ОЦКП входят: ядро – план ПФЭ с $N_0 = 2^n$ точками плана, n_0 (одна для этого плана) центральная точка плана ($x_i = 0, i = 1, 2, 3, \dots, n$) и по две «звездные» точки для каждого фактора:

$$x_i = \pm\alpha, x_j = 0, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, i \neq j,$$

где α – плечо «звездных» точек.

Для ОЦКП каждый фактор варьируется на 5 уровнях: $-\alpha, -1, 0, 1, \alpha$. Плечо звездных точек определяется по формуле [15]:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{N \cdot N_0} - N_0)}, \quad (1)$$

где $N_0 = 2^n$ – число опытов ПФЭ.

Для каждого фактора X_i центр плана X_i^0 определяется выражением:

$$X_i^0 = \frac{X_i^{max} + X_i^{min}}{2}, \quad (2)$$

где X_i^{max}, X_i^{min} – максимальное и минимальное значение фактора в физической величине.

Шаг варьирования i -физической переменной определяется по формуле:

$$h_i = \frac{X_i^{max} - X_i^{min}}{2 \cdot \alpha}. \quad (3)$$

Связь кодированных факторов с физическими определяется выражением:

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{h_i}. \quad (4)$$

По результатам опытов плана формируется полином следующего вида:

$$\dot{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_4(x_1^2 - a) + b_5(x_2^2 - a) + b_6(x_3^2 - a). \quad (5)$$

Коэффициенты полинома $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}, b_4, b_5, b_6$ определяются по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^N x_{iU} Y_U}{\sum_{U=1}^N x_{iU}^2}. \quad (6)$$

Смещение для квадратов факторов находится:

$$a = \sqrt{\frac{N_0}{N}}. \quad (7)$$

Значимость коэффициентов проверяют по критерию Стьюдента. Качество предсказания, обеспечиваемого полученной регрессионной моделью (5), оценивают по критерию Фишера F и коэффициенту детерминации R^2 [16].

Обсуждение результатов. Первая задача – ОЦКП для случая двух факторов.

Эксперимент проводится на технологической установке циркулирования жидкости (рис. 1). В качестве имитации нефтесодержащей жидкости используется полиметилсилоксановая жидкость ПМС-100.

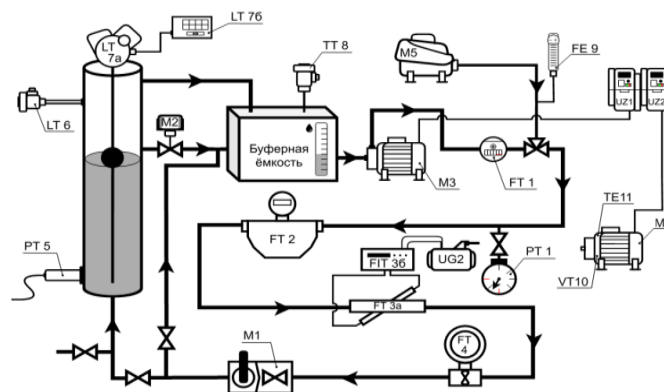


Рис. 1 – Схема установки
 Fig. 1 – Installation diagram

На рис. 1 приведены следующие обозначения:

M1 – Регулирующий клапан SMART QT730622, M2 – Моторизированный шаровый кран Ujin CWX-25S, UZ1 – Преобразователь частоты A150 220 В 1 Ф 0,75 кВт 5 А ONI, M3 – Горизонтальный многоступенчатый насос Grundfos CM1-2, M5 – Поршневой безмаслянный компрессор с ресивером FUBAG, FE 9 – Ротаметр воздуха LZQ-5, PT 5 – Преобразователь гидростатического давления ПД100И, LT 7a – Поплавковый уровнемер ДУУ4МА-(ДУУ2М-01-0)-1,95-1, ЛIT 76 – Вторичный прибор БСД4, LT 6 – Вибрационный сигнализатор уровня Элемер-СВ-11/М1-D-НГ, FT 1 – Импульсный счетчик воды Ду20 Бетар СГВ-20 Д, FT 2 – Кориолисовый расходомер Эмис-Масс 260, FT 3a – Ультразвуковой преобразователь расхода УПР-025-G, FIT 36 – Ультразвуковой расходомер US-800, UG2 – Источник питания ИПТ-05-24, FT 4 – Турбинный расходомер РИЗУР-ДОТ Ду-10, PT 1 – Датчик избыточного давления АИР-10SH-ДИ, TT 8 – Термопреобразователь ТС-1088/1БГ-Р1100, UZ2 – Преобразователь частоты A150 220 В 1 Ф 0,75 кВт 5 А ONI, M4 – Электродвигатель АИР DRIVE 0,18 кВт, VT 10 – Датчики вибрации ДВСТ-4-30-2-К, TE 11 – Датчик температуры ДТС014-Pt100.В3.25/1,5.

В рамках эксперимента выбраны два фактора, существенно влияющих на эффективность циркуляции и качество обработки жидкости: скорость циркуляции (X_1) и газовый фактор (X_2). Газовый фактор, характеризующий объемное содержание газа в жидкости, оказывает значительное воздействие на гидродинамические и теплообменные процессы в системе, что особенно важно для моделирования реальных нефтесодержащих потоков [17]. Применение ортогонального центрального композиционного плана позволило провести

серию экспериментов с варьированием уровней факторов в широком диапазоне, обеспечивая при этом статистическую достоверность результатов и минимизацию взаимных корреляций между переменными. Это обеспечило возможность построения адекватной математической модели, описывающей зависимость ключевых показателей процесса от факторов X_1 и X_2 , включая их взаимодействие и нелинейные эффекты.

Анализ экспериментальных данных показал, что увеличение скорости циркуляции (X_1) положительно сказывается на эффективности перемешивания, что можно выразить через уравнение:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2, \quad (8)$$

где Y – целевая функция (расход двухфазной смеси), $a_0, a_1, a_2, a_{12}, a_{11}$ и a_{22} – коэффициенты, полученные в результате регрессионного анализа.

При этом увеличение скорости циркуляции способствует снижению градиентов концентрации и температуры, что в целом улучшает качество обработки жидкости. В то же время повышение газового фактора (X_2) приводит к усложнению гидродинамического режима, проявляющемуся в увеличении пульсаций, нестабильности потока и потенциальном возникновении кавитационных явлений, что негативно влияет на стабильность и надежность процесса. Взаимодействие факторов выявило выраженные нелинейные эффекты: при низких скоростях циркуляции ($X_1 < X_{1,0}$) увеличение газового фактора (X_2) значительно ухудшает параметры процесса, тогда как при высоких скоростях циркуляции ($X_1 > X_{1,0}$) влияние газа ослабевает за счет более интенсивного перемешивания и стабилизации потока. Это указывает на критическую роль оптимального подбора режимов работы для обеспечения устойчивого функционирования установки.

Построенная модель позволила определить оптимальные режимы эксплуатации технологической установки, обеспечивающие баланс между эффективностью циркуляции и допустимым уровнем газового насыщения. Например, оптимальные значения могут быть найдены с использованием метода градиентного спуска или других методов оптимизации, что позволяет минимизировать функцию потерь:

$$L = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (9)$$

где Y_i – наблюдаемые значения, \hat{Y}_i – предсказанные значения модели.

Данные результаты имеют высокую практическую значимость, поскольку в реальных нефтесодержащих системах присутствие газа неизбежно, и грамотное управление его влиянием является ключевым фактором для обеспечения устойчивой и безопасной работы оборудования.

Таким образом, применение ортогонального центрального композиционного плана совместно с использованием имитационной жидкости ПМС-100 позволило получить ценные и достоверные данные для оптимизации технологических процессов циркуляции и обработки нефтесодержащих жидкостей с учетом комплексного влияния скорости циркуляции и газового фактора. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшего масштабирования исследований и внедрения оптимизированных режимов в промышленную практику, способствуя повышению эффективности и надежности технологических установок, а также анализ полученных данных позволит определить оптимальные области применения для каждого типа расходомеров в условиях присутствия газовой фазы и разработать методы компенсации погрешностей измерений.

Выполним построение уравнения регрессии с учетом ограничений в виде равенств и неравенств на факторы. В этом случае в качестве выходных параметров выступают расход и давление. Скорость циркуляции (X_1) соответствует рабочей частоте насоса, а газовый фактор (X_2) – скорости подачи воздуха в систему. Таким образом, для проведения эксперимента влияния входных параметров на расход и давления выбраны следующие независимые факторы: рабочая частота насоса (Гц) и скорость подачи воздуха в систему (л/мин). Частота насоса задавалась в системе через MASTER SCADA 4D. Регулирование подачи воздуха в систему осуществлялось через ротаметр.

Необходимо провести ОЦКП и составить уравнение двух моделей: расхода и давления в системе с помощью ОЦКП. Запись изменения расхода жидкости в системе фиксировались при помощи турбинного расходомера. Турбинный расходомер выбран, поскольку его принцип измерения основан на механическом вращении турбины, из-за чего он наименее чувствителен к влиянию двухфазных потоков по сравнению с кориолисовым и ультразвуковым расходомером. Давление в системе измерялось при помощи датчика избыточного давления. Дополнительно следует учитывать, при каких показателях целевых переменных жидкость начинает пениться, поскольку это влияет на корректность показаний приборов.

При числе факторов $n = 2$ число опытов ПФЭ составляет $N_0 = 2^2$, число звёздных точек $- 2 \cdot n = 4$. Таким образом, общее число опытов: $N = 4 + 4 + 1 = 9$. Для расчета α используем формулу (1). Для каждого фактора физический диапазон изменения задан. Заполним таблицу параметров ОЦКП (табл. 1).

Таблица 1. Параметры ОЦКП
Table 1. CPXP parameters

Параметры	Частота насоса (Гц)	Скорость подачи воздуха (л/мин)
Границы факторов	[45;50]	[0;5]
Центр плана X_i	47,5	2,5
Шаг варьирования h_i	2,5	2,5
Уровни (физические величины)		
При кодированном уровне -1 (и α)	45	0
При кодированном уровне 0	47,5	2,5
При кодированном уровне +1 (и $-a$)	50	5

Константа преобразования a по формуле (7): $a = \sqrt{\frac{N_0}{N}} = \sqrt{\frac{4}{9}} = \frac{2}{3} \approx 0,667$.

Таким образом, параметры плана $N_0 = 4, N = 9, \alpha = 1, a = \frac{2}{3}, 1 - a = \frac{1}{3}, -a = \frac{2}{3}, \alpha^2 - a = -\frac{2}{3}$. Заполним матрицу планирования (табл. 2).

Таблица 2. Матрица планирования
Table 2. Planning matrix

U	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$x'_3 = \frac{x_3}{x_1 - a}$	$x'_4 = \frac{x_4}{x_2 - a}$	Y_1	\hat{Y}_1	$ \hat{Y}_1 - Y_1 $	Y_2	\hat{Y}_2	$ \hat{Y}_2 - Y_2 $
1	+1	-1	-1	+1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0,465	0,46	0,005	55,35	54,86	0,49
2	+1	+1	-1	-1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0,544	0,5425	0,0015	61,10	61,32	0,22
3	+1	-1	+1	-1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0,40	0,401	0,001	56,0	56,09	0,09
4	+1	+1	+1	+1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0,56	0,565	0,005	73	73,8	0,8
5	+1	-1	0	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0,44	0,443	0,003	59	59,4	0,4
6	+1	+1	0	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0,57	0,566	0,004	72,5	71,483	1,017
7	+1	0	-1	0	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0,49	0,496	0,006	56	56,27	0,27
8	+1	0	+1	0	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0,485	0,478	0,007	64	63,12	0,88
9	+1	0	0	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0,5	0,5001	0,0001	63	63,62	0,62
$\sum_{U=1}^N x_{iU}^2$	9	6	6	4	2	2						

Для случая двух факторов полином (5) преобразуется к виду:

$$\hat{Y}_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_4(x_1^2 - a). \quad (10a)$$

Таким образом, по формулам (6) определяем параметры уравнения регрессии для расхода:

$$\hat{Y}_1 = 0,4948 + 0,0615x_1 - 0,009x_2 + 0,02025x_1x_2 + 0,00483\left(x_1^2 - \frac{2}{3}\right) - 0,01267\left(x_2^2 - \frac{2}{3}\right) = 0,500027 + 0,0615x_1 - 0,009x_2 + 0,02025x_1x_2 + 0,00483x_1^2 - 0,01267x_2^2 \quad (106)$$

Вычислим значения модели (106) по проведенным опытам и занесем результаты в табл. 2. Рассчитаем основные метрики с применением Python (табл. 3, столбец 1). Затем рассчитаем значения t-статистик для критерия Стьюдента (табл. 3, столбец 2).

Таблица 3. Результаты расчета
Table 3. Calculation results

Метрики Metrics	Значения t-статистики критерия Стьюдента Student's t-test values	
Метрики модели:	Коэффициент	t_stat
Остаточная сумма квадратов Qe: 0.000164	0	b0 89.930874
Общая сумма квадратов Qy: 0.025351	1	b1 20.404013
Коэффициент детерминации R ² : 0.9935	2	b2 -2.985953
Критерий Фишера F: 92.4150	3	b12 5.485546
Средняя относительная погрешность: 0.75%	4	b3 0.925820
	5	b4 -2.426287

При уровне доверительной вероятности 0,95 и при 9 наблюдениях критическое значение $t_{крит} = 2,306$. Таким образом, все коэффициенты, кроме b_3 , являются значимыми.

Критерий Фишера составил 92,4150. Определим критическое значение критерия Фишера. Число степеней свободы в числителе $k_1 = p - 1 = 6 - 1 = 5$.

Число степеней свободы в знаменателе $k_2 = N - p = 9 - 6 = 3$. Таким образом, по таблице критическое значение критерия Фишера составляет 9,01, что меньше вычисленного критерия Фишера, что доказывает адекватность модели. После преобразования получаем итоговую модель:

$$\hat{Y}_1 = 0,500027 + 0,0615x_1 - 0,009x_2 + 0,02025x_1x_2 - 0,01267x_2^2.$$

Решим задачу оптимизации, используя функцию *minimize* из библиотеки *SciPy* в Python для нахождения минимума и максимума. По завершении оптимизации алгоритм выведет следующий результат:

```

Максимум Y:
Оптимальная частота насоса x1 = 50.00 Гц
Оптимальное значение скорости подачи воздуха x2 = 3.61 л/мин
Максимальный расход Y = 0.57 м³/ч

Минимум Y:
Оптимальная частота насоса x1 = 45.00 Гц
Оптимальное значение скорости подачи воздуха x2 = 5.00 л/мин
Минимальный расход Y = 0.40 м³/ч
    
```

Также определяем, какие значения принимает расход при фиксированных заданных условиях частоты насоса и скорости подачи воздуха (рис. 2).

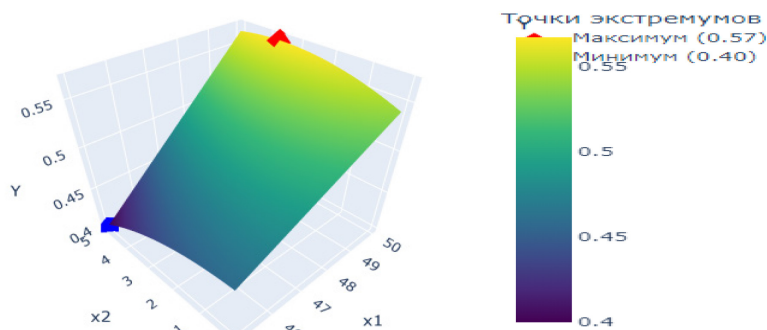


Рис. 2 – Графическое решение задачи оптимизации: красная точка – максимум функции Y, синяя точка – минимум функции Y

Fig. 2 – Graphical solution of the optimization problem: the red point is the maximum of the function Y, the blue point is the minimum of the function Y

Для максимизации расхода рекомендуется эксплуатировать оборудование при задании скорости подачи воздуха на уровне 3,61 л/мин, в то время как частота работы насоса

должна использовать максимально допустимое значение. В случае задачи минимизации расхода оптимальным является выполнение следующих условий: скорость подачи воздуха должна находиться на максимально возможном уровне, а частота работы насоса – на минимально допустимом. Аналогичным образом вычислены коэффициенты для второго уравнения регрессии, что позволило сформировать итоговый полиномиальный многочлен для давления:

$$\hat{Y}_2 = 62,22 + 6,042x_1 + 3,425x_2 + 2,8125x_1x_2 + 1,825\left(x_1^2 - \frac{2}{3}\right) - 3,925\left(x_2^2 - \frac{2}{3}\right).$$

При приведении слагаемых получаем:

$$\hat{Y}_2 = 63,62 + 6,042x_1 + 3,425x_2 + 2,8125x_1x_2 + 1,825x_1^2 - 3,925x_2^2.$$

Решим задачу максимизации расхода при ограничении значения давления в виде неравенства. Запишем задачу в векторной форме. Обозначим вектор переменных через $X = (x_1, x_2)$. Тогда задачу оптимизации можно написать следующим образом:

$$\begin{cases} f(x) \rightarrow \max_x Y_1(X), \\ g_1(X) = P_{min} - Y_2(X) \leq 0, \\ g_2(X) = Y_2(X) - P_{max} \leq 0, \\ 45 \leq x_1 \leq 50, \\ 0 \leq x_2 \leq 5. \end{cases}$$

Примем P_{min} за 50 кПа, $P_{max} = 80$ кПа. Напишем код для решения задачи оптимизации. Получим результат:

```
Оптимизация прошла успешно:
Оптимальная частота насоса x1 = 50.00 Гц
Оптимальная подача воздуха x2 = 3.61 л/мин
Максимальный расход = 0.5716 м³/ч
Давление при этом = 74.18 кПа
```

Вторая задача – ОЦКП для случая трех факторов. Эффективность процесса ректификации нефти во многом зависит от минимизации энергопотребления при разделении смесей. Для анализа того, как различные факторы влияют на энергозатраты в условиях маломощной установки, применяется специальный метод исследования – ОЦКП. Разработанная имитационная секционная модель нефтеперерабатывающей установки служит основой для проведения экспериментов [18]. Энергетические затраты на разделение состоят из подвода энергии для создания парового потока и затрат на охлаждение и конденсацию потока орошения и нефтепродуктов. На маломощную установку ректификации нефти тепло подается с помощью перегретого водяного пара, а отводится через аппарат воздушного охлаждения (АВО). Выходным параметром является тепловая нагрузка АВО $Q_{АВО}$.

Влияющими факторами являются расход перегретого водяного пара Z , флегмовое число Φ , потенциальное содержание светлых фракций в сырье (нефти) PS .

Зависимость энергетических затрат от влияющих факторов имеет следующий вид:

$$Q_{АВО} = f(Z, \Phi, PS). \quad (11)$$

В этом случае при проведении ОЦКП число точек факторного пространства равно 15. Трехфакторный эксперимент выполнен в следующей последовательности.

На первом шаге по общеизвестным формулам определены центр плана X^0_i , шаг варьирования h_i , звездное плечо α , смещение значений квадратов факторов a , уровни варьирования $(-\alpha, 1, 0, +1, \alpha)$. Для случая трех факторов звездное плечо $\alpha=1,215$; параметр смещения $a=0,73$. Перечисленные параметры ОЦКП вычислены и приведены в табл. 4.

На втором шаге выполнено построение матрицы планирования с учетом найденных на первом шаге параметров ОЦКП. Значения выходного параметра $y=Q_{АВО}$ определены по имитационной секционной модели. Матрица планирования для трехфакторного эксперимента составлена по аналогии с предыдущим случаем.

Таблица 4. Параметры ОЦКП
 Table 4. CPXP parameters

X _i	Границы факторов Factor boundaries	x _i	h _i	Уровни варьирования Levels of variation				
				-a	-1	X ⁰ _i	+1	a
Z, %	[3; 5]	x ₁	0,823	3	3,177	4	4,823	5
Φ	[1,2; 1,6]	x ₂	0,165	1,2	1,235	1,4	1,565	1,6
PS, %	[48; 52]	x ₃	1,646	48	48,354	50	50,646	52

По результатам опытов полученного плана сформирован квадратичный полином:

$$y(\vec{x}) = b_0^*x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots \\ \dots + b_{23}x_2x_3 + b_4(x_1^2 - a) + b_5(x_2^2 - a) + b_6(x_3^2 - a), \quad (12a)$$

где b_1 - b_3 – коэффициенты влияния одиночных факторов; b_{12} , b_{13} , b_{23} – коэффициенты взаимного влияния пар факторов; b_4 - b_6 – коэффициенты влияния квадратов факторов; x_0 - x_3 – кодированные факторы; a – смещение значений квадратов факторов; y – выходной параметр.

Коэффициенты уравнения регрессии (12a) вычислены по формулам:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij}y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}; \quad i = \overline{0, 6}; \quad j = \overline{1, 15}.$$

После проверки значимости b -коэффициентов и исключения из модели незначимых коэффициентов осуществлено преобразование уравнения регрессии (12a) в стандартную форму:

$$y(\vec{x}) = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_3^2, \quad (12б)$$

где $b_0 = b_0^*x_0 - a(b_4 + b_5 + b_6)$.

Рассчитанные значения b -коэффициентов записаны в уравнение (12б):

$$y(\vec{x}) = 13754,12 + 894,78x_1 - 75,50x_2 - 83,09x_3 - 27,63x_1x_3 + 20,89x_1^2 + 25,29x_2^2 + 30,37x_3^2.$$

На третьем шаге выполнена проверка адекватности полученной модели. При оценке адекватности модели принято, что параллельных опытов нет. Эксперимент проводился на компьютерной модели. Проведение параллельных опытов приводило к одним и тем же результатам. Проверка адекватности модели (12б) выполнена по критерию Фишера. Табличное значение критерия Фишера $F_{\text{табл}}$ определено с помощью функции Matlab $\text{finv}(\alpha, f_1, f_2)$. $F_{\text{табл}}=3,9823$. Расчетное значение отношения дисперсии среднего и остаточной дисперсии превышает табличное значение, следовательно, модель (12б) адекватна исходным данным.

Вывод. В рамках проведенного исследования успешно реализован ОЦКП для двухфакторного и трехфакторного экспериментов, позволивший построить адекватные квадратичные регрессионные модели. Решены задачи оптимизации расхода и давления в системе транспортировки жидкости в диапазоне скорости воздуха [0; 5] л/мин и оптимизации процесса ректификации нефти на установке малой мощности. Полученные модели подтвердили свою эффективность высокими значениями критерия Фишера и значимостью большинства коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента.

В первом случае решена задача максимизации расхода жидкости при ограничении давления согласно выведенной формуле (10б). Проведенная на основе полученных моделей оптимизация показала оптимальные режимы эксплуатации установки для достижения как максимальных, так и минимальных значений выходных параметров. Полученные результаты показывают, что скорость подачи воздуха влияет на расход и давление в системе. Такая методика применения ОЦКП может быть полезна при проектировании и эксплуатации процессов, где происходит смешение и аэрация, например, в химической, биотехнологической и пищевой промышленности. Результаты можно применить при оценке негативного влияния газовых включений в процессах ТЭК, также они могут быть основой для проверки моделей для других жидкостей с похожими свойствами.

Во втором случае полученная на основе ОЦКП адекватная регрессионная модель (12б) может быть применена для оптимизации процесса ректификации нефти по критерию энергетических затрат. Объект применения – установки ректификации нефти малой мощности. С помощью выведенной формулы (12б) можно определять оптимальные показатели потребления перегретого водяного пара и флегмового числа при изменении исходного состава нефти. Температуры начала и конца кипения нефтепродуктов являются нормируемыми показателями качества и выступают как ограничивающие условия в процессе оптимизации.

Библиографический список:

1. Рудин М.Г., Сомов В.Е., Фомин А.С. Карманный справочник нефтепереработчика. М.: ЦНИТТ-Энефтехим, 2004. 336 с.
2. Tugashova L., Bazhenov R., etc. Approximation method for the potential composition of petroleum fractions // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 471. 03003.
3. Andrijic Z.U., Cvetnic M., Bolf N. Soft sensor models for a fractionation reformat plant using small and bootstrapped data sets // *Brazilian Journal Of Chemical Engineering*. 2018. Vol. 35. P. 745–756. DOI: 10.1590/0104-6632.20180352s20150727.
4. Тугашова Л.Г., Затонский А.В. Исследование качества нефтепродуктов с применением моделей // *Химическая физика и мезоскопия*. 2019. Т. 21. № 4. С. 551-564.
5. Herceg S., Andrijic Z.U., Bolf N. Support Vector Machine-based Soft Sensors in the Isomerisation Process // *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2021. Vol. 34(4). P. 243–255. DOI: 10.15255/CABEQ.2020.1825.
6. Gao Shuzhi, Li Xiaoyu, Zhang Yimin, Wang Jun. A soft-sensor model of VCM rectification concentration based on an improved WOA-RBFNN // *Measurement Science And Technology*. 2021. Vol. 32(8). DOI: 10.1088/1361-6501/abf8ed.
7. Wei Anran, Ye Han, Guo Zhenlin, Xiong Jie SISO-assisted prediction and design of mechanical properties of porous graphene with a uniform nanopore array. *Nanoscale Adv.* 2022. Vol. 4(5). P. 1455-1463. DOI: 10.1039/d1na00457c.
8. Fujii K., Yamamoto T. Development of a Nonlinear Soft Sensor Using a GMDH Network for a Refinery Crude Distillation Tower. *Electrical Engineering in Japan*. 2014;188:31-38. DOI: 10.1002/ej.22459.
9. Губайдуллин М.Г., Крайнева О.В. Экспертная оценка потенциального воздействия нефти на геологическую среду прибрежной зоны юго-восточной части Баренцева моря // *НТЖ «Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе»*. М:ВНИИОЭНГ. 2014. № 4. С. 9-14.
10. Ayele B., Lu J., Chen Q. Optimization of aeration enhanced surfactant soil washing for remediation of diesel-contaminated soils using response surface methodology // *PeerJ*. 2020. Vol. 8. DOI: 10.7717/peerj.8578.
11. Aziz S.Q., Fakhri I.S. Optimization of aeration style and cycle time for treatment of oil refinery wastewater using powdered activated carbon and sequential batch reactor. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*. 2017;29(4.):140-153.
12. Беклемищев Ф.С., Селиванова В.А. Построение и исследование модели с использованием ортогонального центрального композиционного плана Бокса в среде SIMINTECH // *Инициатива в науке как новая стратегия развития системы знаний: сб. науч. тр.* Казань: ООО «СитИвент», 2019. С. 248-257.
13. Аптикаева А.А. Оптимизация условий культивирования штамма алкалофильных бактерий *Raenibacillus mannanolyticus* – продуцента вязкого экзополисахарида // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 3. С. 593.
14. Вальшин И.Р. Новые методы интенсификации массообменных процессов при обессоливании нефти // *Нефть. Газ. Новации*. 2018. № 5. С. 24-29.
15. Сазонникова Н.А. Управление технологическими процессами: электрон. учеб. пособие. Самара: Издательство Самарского университета, 2017. 192 с.
16. Затонский А.В., Тугашова Л.Г. Моделирование объектов управления в MatLab: учеб. пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2022. 144 с.
17. Абрамов Г.С., Сарычев А.В. Практическая расходомерия в нефтяной промышленности. М: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2002. 144 с.
18. Дмитриевский Б.С., Затонский А.В., Тугашова Л.Г. Задача управления процессом ректификации нефти и метод ее решения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 2. С. 136-145.

References:

1. Rudin M.G., Somov V.E., Fomin A.S. Pocket handbook of the oil refiner. Moscow: TSNITTEneftkhim; 2004:336 p. (In Russ)
2. Tugashova L., Bazhenov R., etc. Approximation method for the potential composition of petroleum fractions. *E3S Web of Conferences*. 2024; 471. 03003.

3. Andrijic Z.U., Cvetnic M., Bolf N. Soft sensor models for a fractionation reformat plant using small and bootstrapped data sets. *Brazilian Journal Of Chemical Engineering*. 2018;35:745–756. DOI: 10.1590/0104-6632.20180352s20150727.
4. Tugashova L.G., Zatonsky A.V. Investigation of petroleum-product quality using models. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2019;21(4):551–564. (In Russ)
5. Herceg S., Andrijic Z.U., Bolf N. Support Vector Machine-based Soft Sensors in the Isomerisation Process *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2021;34(4):243–255. DOI: 10.15255/CABEQ.2020.1825.
6. Gao Shuzhi, Li Xiaoyu, Zhang Yimin, Wang Jun. A soft-sensor model of VCM rectification concentration based on an improved WOA-RBFNN. *Measurement Science and Technology*. 2021;32(8). DOI: 10.1088/1361-6501/abf8ed.
7. Wei Anran, Ye Han, Guo Zhenlin, Xiong Jie SISSO-assisted prediction and design of mechanical properties of porous graphene with a uniform nanopore array. *Nanoscale Adv.* 2022; 4(5):1455-1463. DOI: 10.1039/d1na00457c.
8. Fujii K., Yamamoto T. Development of a Nonlinear Soft Sensor Using a GMDH Network for a Refinery Crude Distillation Tower. *Electrical Engineering in Japan*. 2014;188: 31-38. DOI: 10.1002/ej.22459.
9. Gubaidullin M.G., Krayneva O.V. Expert assessment of the potential impact of oil on the geological environment of the coastal zone of the southeastern Barents Sea. *Environmental Protection in the Oil and Gas Complex*. Moscow: All-Russian Scientific Research Institute for Organization, Management and Economics of the Oil and Gas Industry (VNIIOENG); 2014;(4):9-14. (In Russ)
10. Ayele B., Lu J., Chen Q. Optimization of aeration enhanced surfactant soil washing for remediation of diesel-contaminated soils using response surface methodology. *PeerJ*. 2020; 8. DOI: 10.7717/peerj.8578.
11. Aziz S.Q., Fakhri I.S. Optimization of aeration style and cycle time for treatment of oil refinery wastewater using powdered activated carbon and sequential batch reactor. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*. 2017; 29(4):140-153.
12. Beklemishchev F.S., Selivanova V.A. Construction and investigation of a model using Box’s orthogonal central composite design in the Simintech environment. In: Initiative in Science as a New Strategy for the Development of the Knowledge System: Proc. of Sci. Works. Kazan: SitIvent LLC; 2019:248–257. (In Russ)
13. Aptikaeva A.A. Optimization of cultivation conditions of the alkalophilic bacterium strain *Paenibacillus mannanolyticus* – producer of viscous exopolysaccharide. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;(3):593. (In Russ)
14. Valshin I.R. New methods of intensification of mass-transfer processes in oil desalting. *Oil. Gas. Innovations*. 2018; (5):24–29. (In Russ)
15. Sazonnikova N.A. Management of technological processes: electronic textbook. Samara: Samara University Publishing; 2017:192 p. (In Russ)
16. Zatonsky A.V., Tugashova L.G. Modeling of control objects in MatLab: textbook. St. Petersburg: Lan Publishing; 2022:144 p. (In Russ)
17. Abramov G.S., Sarychev A.V. Practical Flowmetering in Oil Industry: textbook. Moscow: JSC op. «VNIIOENG»; 2002: 460 p. (In Russ)
18. Dmitrievsky B.S., Zatonsky A.V., Tugashova L.G. Control problem of oil rectification process and its solution method. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*. 2018; 329(2):136–145. (In Russ)

Сведения об авторах:

Тугашова Лариса Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и информационных технологий; tugashova@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-9331-3142

Ситдикова Ирина Петровна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизации и информационных технологий; sitdikova_ip@mail.ru

Латипов Булат Наилевич, магистрант кафедры автоматизации и информационных технологий; latipov.2002bulat@mail.ru

Information about authors:

Larisa G. Tugashova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Automation and Information Technology; tugashova@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-9331-3142

Irina P. Sitdikova, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Automation and Information Technology; sitdikova_ip@mail.ru

Bulat N. Latipov, Master's Student, Department of Automation and Information Technology; latipov.2002bulat@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 30.07.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 01.09.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 01.11.2025.