

Метод планирования петрофизических исследований для прогнозирования эффективности термополимерного воздействия в условиях ограниченности кернового материала

Константин Михайлович Федоров¹,
Александр Янович Гильманов¹✉,
Александр Павлович Шевелёв¹,
Дарья Николаевна Гусева²

¹ Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

² ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

✉ Контакт для переписки: a.y.gilmanov@utmn.ru

Аннотация. В настоящий момент хорошо проработаны задачи математической статистики, связанные с планированием экспериментов и получением корреляционных зависимостей. Однако особенно актуально планирование экспериментов в условиях ограниченного набора исследуемых образцов с дискретным детерминированным набором характеристик от нескольких влияющих параметров. Поэтому целью работы является планирование петрофизических экспериментов для получения корреляционных зависимостей коэффициента вытеснения нефти от концентрации полимера, температуры и проницаемости образца керна для последующего моделирования термополимерного воздействия. Впервые предлагается метод, позволяющий использовать один образец керна в нескольких последовательных экспериментах, связанных с таким воздействием. В рамках такого подхода разработан метод определения минимального количества измерений и обоснованного выбора значений измеряемых параметров для полного охвата заданного диапазона с заданной точностью. Этот метод основан на использовании ротatableльного центрально-композиционного планирования эксперимента 2 порядка с учётом особенностей петрофизических фильтрационных экспериментов. Получена минимально необходимая выборка образцов горной породы и значений влияющих параметров и обоснован поря-

док проведения исследований, позволяющих получить интерполяционную зависимость. Планирование эксперимента и применение аппарата математической статистики позволило в 8 раз сократить количество экспериментов и в 3 раза сократить количество используемого керна для получения искомой корреляции.

Ключевые слова: математическая статистика, корреляционная зависимость, ротатбельное центрально-композиционное планирование эксперимента (РЦКП), петрофизические исследования, фильтрационные эксперименты, образец керна, коэффициент вытеснения нефти, проницаемость, термополимер

Цитирование: Федоров К. М., Гильманов А. Я., Шевелёв А. П., Гусева Д. Н. 2025. Метод планирования петрофизических исследований для прогнозирования эффективности термополимерного воздействия в условиях ограниченности керна // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 11. № 1 (41). С. 125–143. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-1-125-143>

Поступила 20.09.2024; одобрена 10.02.2025; принята 18.04.2025

Method for planning petrophysical research to predict the thermopolymer flooding effectiveness with limited core material

Konstantin M. Fedorov¹,
Alexander Ya. Gilmanov¹✉,
Alexander P. Shevelev¹,
Daria N. Guseva²

¹ University of Tyumen, Tyumen, Russia

² Tyumen Petroleum Research Center LLC, Tyumen, Russia

✉ Corresponding author: a.y.gilmanov@utmn.ru

Abstract. At the moment, the problems of mathematical statistics related to the planning of experiments and obtaining correlation dependencies are well developed. However, it is especially important to plan experiments in conditions of a limited set of researched samples with a discrete deterministic set of characteristics from several influencing parameters. Therefore, the aim of this work is to plan petrophysical experiments to obtain correlation dependences of the oil displacement coefficient on the polymer concentration, temperature, and permeability of the core sample for

subsequent modeling of thermopolymer flooding. The authors propose a unique method for the use of a single core sample in several consecutive experiments related to such technology. Within this approach, a new method has been developed to determine the minimum number of measurements and a reasonable choice of values of the measured parameters to fully cover a given range with a given accuracy. This method is based on the use of central composite rotatable design (CCRD) of experiment of the second order, considering the features of petrophysical filtration experiments. The minimum required sample of rock samples and the values of the influencing parameters were obtained and the procedure for conducting research to obtain an interpolation dependence was justified. Planning the experiment and using mathematical statistics, the authors managed to reduce the number of experiments by 8 times and the amount of core material used by 3 times to obtain the required correlation.

Keywords: mathematical statistics, correlation dependence, central composite rotatable design of experiment (CCRD), petrophysical studies, filtration experiments, core sample, oil displacement coefficient, permeability, thermopolymer

Citation: Fedorov, K. M., Gilmanov, A. Ya., Shevelev, A. P., & Guseva, D. N. (2025). Method for planning petrophysical research to predict the thermopolymer flooding effectiveness with limited core material. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 11(1), 125-143. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-1-125-143>

Received 20.09.2024; Reviewed 10.02.2025; Accepted 18.04.2025

Введение

Проектирование разработки месторождений нефти и газа подразумевает использование гидродинамических симуляторов для определения оптимальных технологических параметров [Назарова, Скоров, 2020]. Работа таких симуляторов требует использования исходной информации о моделируемом объекте [Jiang J. и др., 2019]. Получение этой информации невозможно без комплекса геофизических, гидродинамических и петрофизических исследований объекта разработки [Зернин и др., 2021; Мостовой и др., 2021; Andersen, 2024]. Среди петрофизических исследований особое место занимают лабораторные эксперименты с образцами горной породы — керном [Andersen, 2024]. Получение этих образцов для серии полномасштабных экспериментов является неоправданно дорогостоящей и длительной процедурой. Однако эти эксперименты необходимы для получения корреляционных зависимостей между фильтрационно-емкостными свойствами пласта и физико-химическими свойствами пластовых флюидов [Гильманов, Яценко, 2023]. Ограниченность керна вносит высокую погрешность в построение таких зависимостей. В свою очередь, эта неточность существенным образом влияет на результаты гидродинамического моделирования, увеличивая погрешность

определения расчётных значений технологических параметров. Поэтому целесообразным является планирование экспериментов [Мирзаджанзаде, Степанова, 1977; Санников, 2010; Алибеков, Михалев, 2013], позволяющее минимизировать погрешность искомых зависимостей при сравнительно небольшом и ограниченном наборе образцов кернового материала.

Применение аппарата математической статистики позволяет уменьшить количество требуемых экспериментов для получения наиболее репрезентативной выборки [Fisher, 1971; Афанасьева, 2010; Никитин, 2012; Казаков, 2014; Rodrigues, Iemma, 2014]. Минимальное количество исследуемых образцов керна определяет количество проводимых экспериментов, которое, в свою очередь, определяет точность расчёта параметров на основе установленной корреляционной зависимости. Определение числа требуемых экспериментов возможно с использованием критерия Фишера-Снедекора [Fisher, 1971]. С другой стороны, точность экспериментов также определяется выбором экспериментальных точек для получения многопараметрической зависимости. Одним из наиболее эффективных способов выбора точек является ротatable центральное композиционное планирование (РЦКП) [Box, Draper, 2007; Мылтыкбаева, Ковалева, 2020; Kayaroganam, 2021; Zaharia, Suteu, 2022]. Оно позволяет задать предельную погрешность вычислений для всей требуемой выборки [Jha, Sit, 2021; Jiang Q. и др., 2021; Saber и др., 2021; Danish и др., 2022; da Nobrega Santos и др., 2023].

Особую роль планирование эксперимента играет при исследованиях кернового материала в рамках прогнозирования эффективности термополимерного воздействия, поскольку в этом случае, как правило, один образец кернового материала может быть исследован только в рамках одного эксперимента в силу явлений адсорбции и удерживания реагента [Никифоров, Никаньшин, 1998]. Поэтому целью работы является планирование петрофизических экспериментов для получения корреляционных зависимостей коэффициента вытеснения нефти от концентрации полимера, температуры и проницаемости образца керна для последующего моделирования термополимерного воздействия. Впервые предлагается метод, позволяющий использовать один образец керна в нескольких последовательных экспериментах, связанных с таким воздействием. В рамках такого подхода требуется разработать метод определения минимального количества измерений и обоснованного выбора значений измеряемых параметров для полного охвата заданного диапазона с заданной точностью и планируется развитие теории интерполяции на многомерные задачи. Здесь и далее под количеством измерений понимается количество экспериментов с отличными от уже проведённых исследований значениями параметров.

Методы

Статистическое планирование потоковых экспериментов подразумевает выделение из физических соображений групп исследуемых факторов. Например, для керновых исследований коэффициента вытеснения нефти такими группами являются концентрация полимера, температура и проницаемость образца керна. Эксперименты проводятся

на моделях пористой среды, состоящих из 5 разных образцов горной породы, близких по проницаемости.

В случае достаточности и полноты ядерного материала исследования по зависимости коэффициента вытеснения нефти от концентрации полимера, температуры и проницаемости горной породы должны проводиться строго в соответствии с установленным регламентом. Однако в ряде случаев необходимо проводить оценки коэффициента вытеснения в условиях недостаточности образцов горной породы. В этом случае строго придерживаться регламента проведения исследований не представляется возможным, и выходом из сложившейся ситуации является использование предлагаемого авторами метода.

Для каждой группы влияющих параметров проводят серию небольшого количества экспериментальных измерений (5–10) поочередно для всех параметров, вошедших в группу (табл. 1). В таблице приведены округлённые данные реальных экспериментов. Значения проницаемости образцов в моделях ядер подбирались таким образом, чтобы её средние значения для разных моделей отличались по порядку величины. В табл. 1 приведён порядок величины среднего значения проницаемости. Для статистической обработки полученной информации удобно ввести следующие обозначения: p — количество параметров, вошедших в группу (в рассматриваемом случае это 5, т.к. на практике используется 5 разных концентраций полимера), q — количество измерений для каждого параметра (в рассматриваемом случае это 5), $K_{\text{выт}ij}$ — результат измерения в i -м измерении для j -го параметра (в рассматриваемом случае $K_{\text{выт}}$ — это коэффициент вытеснения нефти), $\overline{K_{\text{выт}j}}$ — среднее значение измеряемой величины для параметра j (в рассматриваемом случае это средние значения коэффициента вытеснения нефти по 5 измерениям для каждой концентрации), $\overline{K_{\text{выт}}}$ — среднее значение измеряемой величины по всем измерениям (в данном примере это средние значения коэффициента вытеснения нефти по всем измерениям). Далее рассчитываются общая сумма квадратов отклонений измеряемых значений величины от среднего значения измеряемой величины по всем измерениям [Fisher, 1971; Ахметжанова, Антонова, 2016; Казаков, 2014]

$$S_a = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^q (K_{\text{выт}ij} - \overline{K_{\text{выт}j}})^2, \quad (1)$$

межгрупповая сумма квадратов отклонений средних значений измеряемой величины для параметра j от среднего значения измеряемой величины по всем измерениям [Fisher, 1971; Ахметжанова, Антонова, 2016; Казаков, 2014]

$$S_f = q \sum_{j=1}^p (\overline{K_{\text{выт}j}} - \overline{K_{\text{выт}}})^2, \quad (2)$$

остаточная сумма квадратов отклонений измеренных значений величины для j -го параметра от среднего значения измеряемой величины для j -го параметра [Fisher, 1971; Ахметжанова, Антонова, 2016; Казаков, 2014]

$$S_r = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^q (K_{\text{выт}ij} - \overline{K_{\text{выт}j}})^2. \quad (3)$$

Далее рассчитывается отношение межгрупповой дисперсии к остаточной дисперсии — критерий Фишера-Снедекора [Fisher, 1971; Ахметжанова, Антонова, 2016; Казаков, 2014]

$$F_e = \frac{S_f^2}{S_r^2}. \quad (4)$$

После этого сравнивается рассчитанное значение F_e с критическим значением F_α , которое соответствует сопоставимым дисперсиям j -х параметров для выбранной группы и берётся из специальных таблиц в зависимости от количества параметров в группе, количества измерений при заданной погрешности измерений ϵ (обычно 5%). Если $F_e < F_\alpha$, то для этой группы параметров измерения не проводятся [Fisher, 1971; Казаков, 2014].

Табл. 1. Экспериментальные значения коэффициента вытеснения нефти в зависимости от концентрации полимера, проницаемости образца и температуры

Table 1. Experimental values of the oil displacement coefficient depending on the polymer concentration, sample permeability, and temperature

№ измерения	Массовая концентрация, %				
	0,05	0,1	0,125	0,15	0,175
1	0,310	0,340	0,336	0,345	0,356
2	0,299	0,320	0,338	0,352	0,353
3	0,330	0,312	0,333	0,340	0,362
4	0,325	0,336	0,338	0,331	0,360
5	0,326	0,333	0,344	0,353	0,353
№ измерения	Проницаемость, мД				
	0,1	1	10	100	1000
1	0,231	0,255	0,270	0,300	0,354
2	0,232	0,259	0,272	0,310	0,355
3	0,235	0,256	0,272	0,303	0,353
4	0,227	0,255	0,274	0,305	0,359
5	0,239	0,254	0,273	0,306	0,346
№ измерения	Температура, °С				
	30	45	60	75	90
1	0,310	0,321	0,335	0,341	0,351
2	0,314	0,321	0,336	0,348	0,352
3	0,305	0,313	0,337	0,342	0,354
4	0,316	0,332	0,335	0,340	0,357
5	0,317	0,324	0,336	0,344	0,349

Для оставшихся параметров минимальное количество измерений оценивается по формуле [Fisher, 1971; Казаков, 2014]

$$q_{min} = \left(\frac{t\sqrt{S_a}}{\overline{K}_{\text{выт}}\varepsilon} \right)^2, \quad (5)$$

где t — коэффициент Стьюдента, берущийся из таблиц.

Для измерений коэффициента вытеснения нефти при различных концентрациях полимера из табл. 1 критерий Фишера-Снедекора равен $F_e = 6,77$. Его критическое значение для пяти измерений и пяти значений концентраций полимера равно $F_c = 4.43$ [Fisher, 1971]. Поскольку $F_e > F_c$, то в исследованиях по определению коэффициента вытеснения нефти для разных значений концентраций полимера нужно определить минимальное количество измерений по формуле (5), которое в этом случае равно $q_{min} = 87$, т.е. для исследования недоступного порового объема для различных значений проницаемости породы для максимальной точности корреляционных зависимостей необходимо проводить 87 измерений. Аналогично для различных значений проницаемости образцов керна критерий Фишера-Снедекора равен $F_e = 31409 > F_c$, $q_{min} = 893$; для различных значений температуры критерий Фишера-Снедекора равен $F_e = 201 > F_c$, $q_{min} = 81$. Полная выборка при всех представленных комбинациях значений концентрации полимера, проницаемости образцов керна и температуры составляет $5^3 = 125$ измерений (табл. 1). По двум параметрам (температура и концентрация) это позволяет сократить полную выборку. Однако такое количество измерений неоправданно велико на практике, поэтому целесообразно его сократить с использованием ротатбельного центрально-композиционного планирования эксперимента.

В практике петрофизических фильтрационных экспериментов значения проницаемости разных образцов керна имеют дискретный и неравномерный детерминированный характер, что осложняет планирование эксперимента. Ограниченность и дороговизна кернового материала обуславливают снижение количества экспериментов до 3 значений концентрации полимера и температур. В рассматриваемом случае имеется 15 образцов керна с различной проницаемостью k для одного из месторождений Западной Сибири (табл. 2). В экспериментах используется 3 значений массовой концентрации полимера c : 0,05%, 0,1%, 0,175%; и 3 значения температуры T : 20 °C, 60 °C, 90 °C.

Табл. 2. Проницаемости образцов керна

Table 2. Core samples permeabilities

№ образца	k , мД	№ образца	k , мД
1	203	9	719
2	258	10	626
3	414	11	453
4	306	12	772
5	362	13	920
6	501	14	887
7	1088	15	1465
8	580		

Алгоритм ротатбельного центрально-композиционного планирования 2 порядка в рассматриваемом случае состоит в следующем:

1. Определяется количество необходимых экспериментов по формуле [Кауароган-ам, 2021; Zaharia, Suteu, 2022; Казаков, 2014; Мирзаджанзаде, Степанова, 1977]:

$$N = 2^{n-p} + 2n + N_0 = 2^{3-0} + 2 \cdot 3 + 1 = 15, \quad (6)$$

где N — общее число точек эксперимента; N_0 — количество центральных точек, равное $N_0 = 1$, n — количество групп исследуемых факторов (для ядерных исследований коэффициента вытеснения выделенными группами являются: проницаемость образцов, концентрация термополимера и температура).

2. Выбор значений концентрации полимера и температуры производится таким образом, чтобы они приводили к существенным отличиям в значениях коэффициентов кинематической (динамической) вязкости. Реология полимера описывается в рамках модели псевдопластичной жидкости. В табл. 3 приведена зависимость кинематической вязкости полимера от его концентрации и температуры для полиакриламида. Отсюда выбраны 3 значения концентрации полимера: 0,05%, 0,1% и 0,175%.

Табл. 3. Кинематическая вязкость полимера, мм²/с

Table 3. Polymer kinematic viscosity, mm²/s

Массовая концентрация, %	Температура, °С			
	20	40	70	90
0,05	3,258	1,984	1,216	0,896
0,1	7,574	4,093	2,502	1,743
0,125	9,229	5,26	3,101	2,203
0,15	11,768	6,974	3,923	2,816
0,175	13,133	7,483	4,308	3,048

3. В качестве центральной точки выбирается точка (зелёная точка на рис. 1), значения параметров в которой максимально близко расположены к среднему значению влияющих параметров (k_{av} , c_{av} , T_{av}):

$$k_{av} = \frac{k_{max} + k_{min}}{2}, \quad (7)$$

$$c_{av} = \frac{c_{max} + c_{min}}{2}, \quad (8)$$

$$T_{av} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}, \quad (9)$$

где k_{av} — среднее значение проницаемости, c_{av} — среднее значение концентрации термополимера, T_{av} — среднее значение температуры, k_{min} и k_{max} — минимальное

и максимальное значение проницаемости, c_{min} и c_{max} — минимальное и максимальное значение концентрации термополимера, T_{min} и T_{max} — минимальное и максимальное значение температуры. Здесь под средним значением параметра понимается среднее арифметическое между минимальным и максимальным значением этого параметра, необходимое для определения центральной точки плана.

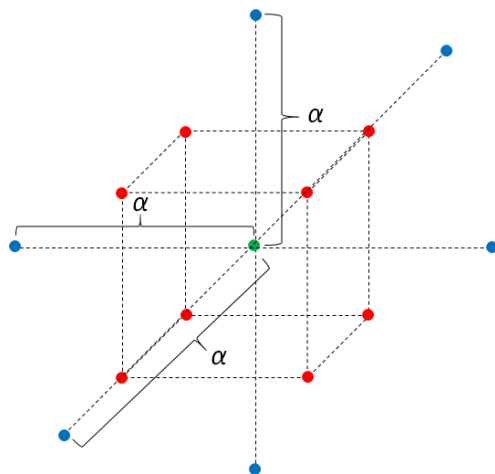


Рис. 1. Схема расположения экспериментальных точек при РЦКП

Fig. 1. The layout of the experimental points at the CCRD

4. Находится размер «звёздного плеча» по формуле [Кауароганам, 2021; Zaharia, Suteu, 2022; Казаков, 2014; Мирзаджанзаде, Степанова, 1977]

$$\alpha = 2^{n/4} = 2^{3/4} \approx 1,68, \quad (10)$$

которое характеризует точки, максимально удалённые от центральной (синие точки на рис. 1), которые и выбираются в качестве «звёздных» точек.

5. Производится нормировка всех значений влияющих параметров таким образом, чтобы центральная точка соответствовала нулевым значениям влияющих параметров:

$$K = \frac{\alpha(k - \frac{k_{max} + k_{min}}{2})}{k_{max} - k_{min}}, \quad (11)$$

$$C = \frac{\alpha(c - \frac{c_{max} + c_{min}}{2})}{c_{max} - c_{min}}, \quad (12)$$

$$\theta = \frac{\alpha(T - \frac{T_{max} + T_{min}}{2})}{T_{max} - T_{min}}, \quad (13)$$

где K, C, θ — безразмерные проницаемость, концентрация термополимера, температура.

6. По известному значению «звездного» плеча определяется размер ядра в нормированных значениях, поэтому в качестве 2^n точек ядра выбираются точки, значения влияющих параметров в которых наиболее близки к значениям в вершинах единичного куба, построенного в пространстве нормированных параметров: $(-1, -1, -1)$; $(-1, -1, 1)$; $(-1, 1, -1)$; $(-1, 1, 1)$; $(1, -1, -1)$; $(1, -1, 1)$; $(1, 1, -1)$; $(1, 1, 1)$ (красные точки на рис. 1). Это делается для того, чтобы охватить все возможные комбинации максимальных и минимальных в ядре нормированных значений влияющих параметров (ротатабельное планирование позволяет добавлять точки ядра для повышения точности получаемой регрессионной зависимости).
7. Значения коэффициента вытеснения в точках, для которых эксперименты не проводятся, рассчитываются с применением методов статистической интерполяции.

Уравнение регрессии записывается в следующей форме [Kararoganam, 2021; Zaharia, Suteu, 2022; Казаков, 2014]:

$$K_{\text{выт}} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j, \quad (14)$$

где $K_{\text{выт}}$ — коэффициент вытеснения, x_i — значение влияющего параметра (в рассматриваемом случае $i = 1$ соответствует k , $i = 2 - c$, $i = 3 - T$), β_0 , β_i , β_{ij} — коэффициенты уравнения регрессии, определяемые по формулам, выведенным с использованием метода наименьших квадратов:

$$\beta_0 = \frac{A}{N} \left(\lambda_3 \sum_{l=1}^N k_l K_{\text{выт}l} - 2\lambda_1 \lambda_2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^N x_{il}^2 K_{\text{выт}l} \right) - \lambda_4 \sum_{i=1}^n \beta_{ii}, \quad (15)$$

$$\beta_i = \frac{\lambda_2}{N} \sum_{l=1}^N x_{il} K_{\text{выт}l}, \quad (16)$$

$$\beta_{ij} = \begin{cases} \frac{\lambda_2^2}{N\lambda_1} \sum_{l=1}^N x_{il} x_{jl} K_{\text{выт}l}, & i \neq j, \\ \frac{A}{N} \left(\lambda_5 \sum_{l=1}^N x_{il}^2 K_{\text{выт}l} + \lambda_6 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^N x_{il}^2 K_{\text{выт}l} - \lambda_7 \sum_{l=1}^N x_{il}^2 K_{\text{выт}l} \right), & i = j, \end{cases} \quad (17)$$

где x_{il} — значение i -го влияющего параметра в l -м эксперименте, k_l — проницаемость в l -м эксперименте, коэффициенты A , λ_1 , λ_2 , λ_3 , λ_4 , λ_5 , λ_6 , λ_7 равны:

$$A = \frac{1}{2\lambda_1((n+2)\lambda_1 - n)}, \quad (18)$$

$$\lambda_1 = \frac{2^{n-p}\lambda_2^2}{N}, \quad (19)$$

$$\lambda_2 = \frac{N}{2^{n-p} + 2\alpha^2}, \quad (20)$$

$$\lambda_3 = 2\lambda_1^2(n+2), \quad (21)$$

$$\lambda_4 = \frac{2^{n-p} + 2\alpha^2}{N}, \quad (22)$$

$$\lambda_5 = \lambda_2^2((n+2)\lambda_1 - n), \quad (23)$$

$$\lambda_6 = \lambda_2^2(1 - \lambda_1), \quad (24)$$

$$\lambda_7 = 2\lambda_1\lambda_2. \quad (25)$$

8. Для оценки погрешности интерполяции рассчитывается среднеквадратичное отклонение расчётных интерполированных точек от экспериментальных значений в известных узлах формы [Казаков, 2014]:

$$S_{\text{КВЫТ}} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^N (K_{\text{ВЫТ}l} - \overline{K_{\text{ВЫТ}}})^2}{N}}. \quad (26)$$

Среднеквадратичные отклонения коэффициентов регрессии определяются по формулам:

$$S_0 = \lambda_1 S_{\text{КВЫТ}} \sqrt{\frac{2A(n+2)}{Nm}}, \quad (27)$$

$$S_i = S_{\text{КВЫТ}} \sqrt{\frac{\lambda_2}{Nm}}, \quad (28)$$

$$S_{ij} = \begin{cases} \frac{S_{\text{КВЫТ}}\lambda_2}{\sqrt{\lambda_1 Nm}}, i \neq j, \\ S_{\text{КВЫТ}}\lambda_2 \sqrt{\frac{A}{Nm}((n+1)\lambda_1 - n + 1)}, i = j, \end{cases} \quad (29)$$

где S_0, S_i, S_{ij} — среднеквадратичные отклонения коэффициентов $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$, m — число прогонов (в рассматриваемом случае 1).

Результаты и обсуждение

Поскольку имеющиеся значения параметров для доступных для экспериментов точек не соответствуют в точности требуемым точкам для ядра, то ядро выбирается из близких к этим значениям точек с учётом максимального количества точек при минимальной температуре для задания в симуляторе CMG STARS (вариант 1) или максимально возможного охвата крайних значений параметров для получения регрессии (вариант 2), с учётом этого также корректируются «звёздные» точки. Расположение точек показано на рис. 2. Выбранные значения влияющих параметров приведены в табл. 4 для варианта 1 и в табл. 5 для варианта 2, где синим цветом обозначены номера экспериментов для «звёздных» точек, красным цветом обозначены номера экспериментов для точек «ядра», зеленым цветом обозначен номер эксперимента для «центральной» точки.

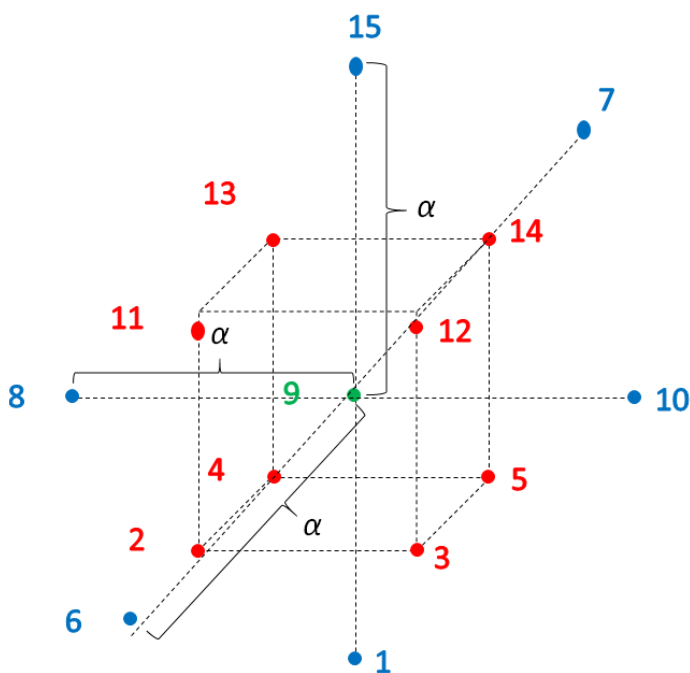


Рис. 2. Номера экспериментальных точек при РЦКП (синим цветом обозначены номера экспериментов для «звездных» точек, красным цветом обозначены номера экспериментов для точек «ядра», зеленым цветом обозначен номер эксперимента для «центральной» точки)

Fig. 2. Numbers of the experimental points at the CCRD (experiment numbers for the “star” points are in blue, for the “core” points — red, for the “central” point —in green)

Количество экспериментов в случае охвата всех возможных комбинаций равно 135 (15 значений проницаемости, 3 значения температуры и 3 значения концентрации полимера, т.е. полное количество экспериментов равно $15 \cdot 3 \cdot 3$). В случае РЦКП 2 порядка количество экспериментов можно сократить в 8 раз до 15.

Табл. 4. Значения влияющих параметров на коэффициент вытеснения, вариант 1 для симулятора CMG STARS)

Table 4. Values of the influencing parameters on the displacement coefficient, option 1 (for the CMG STARS simulator)

№ эксперимента	<i>k</i> , мД	<i>c</i> , %	<i>T</i> , °С
1 («звёздная»)	203	0,05	60
2 («ядро»)	258	0,05	90
3 («ядро»)	414	0,175	90
4 («ядро»)	306	0,05	20
5 («ядро»)	362	0,175	20
6 («звёздная»)	501	0,1	20
7 («звёздная»)	1088	0,175	20
8 («звёздная»)	580	0,05	20
9 («центральная»)	719	0,1	60
10 («звёздная»)	626	0,175	20
11 («ядро»)	453	0,1	90
12 («ядро»)	772	0,175	60
13 («ядро»)	920	0,05	20
14 («ядро»)	887	0,1	20
15 («звёздная»)	1465	0,175	90

Табл. 5. Значения влияющих параметров на коэффициент вытеснения, вариант 2 (для формирования корреляции)

Table 5. Values of the influencing parameters on the displacement coefficient, option 1 (for the correlation equation)

№ эксперимента	<i>k</i> , мД	<i>c</i> , %	<i>T</i> , °С
1 («звёздная»)	203	0,05	60
2 («ядро»)	362	0,05	90
3 («ядро»)	414	0,175	90
4 («ядро»)	258	0,1	60
5 («ядро»)	306	0,175	20
6 («звёздная»)	580	0,1	90
7 («звёздная»)	501	0,05	20
8 («звёздная»)	1088	0,05	20
9 («центральная»)	719	0,1	60
10 («звёздная»)	626	0,175	60
11 («ядро»)	920	0,05	90
12 («ядро»)	772	0,175	90
13 («ядро»)	887	0,1	60
14 («ядро»)	453	0,175	20
15 («звёздная»)	1465	0,1	20

В силу ограниченности кернавого материала предлагается подход, позволяющий сократить количество исследуемых образцов горной породы за счёт проведения последовательных экспериментов на одном образце с поэтапным увеличением концентрации полимера и температуры (рис. 3), поскольку в такой последовательности экспериментов коэффициент вытеснения нефти возрастает. Проведение таких исследований позволяет определить объём жидкости, довытесненной за счёт изменения концентрации полимера или температуры. Коэффициент вытеснения нефти при заданных значениях этих параметров корректируется путём добавления довытесненного объёма жидкости к накопленному объёму в результате исследований на выбранном образце горной породы.

Проведение обратной процедуры на одном и том же образце невозможно в силу того, что уже в первом эксперименте вытесняется максимально возможное количество нефти.

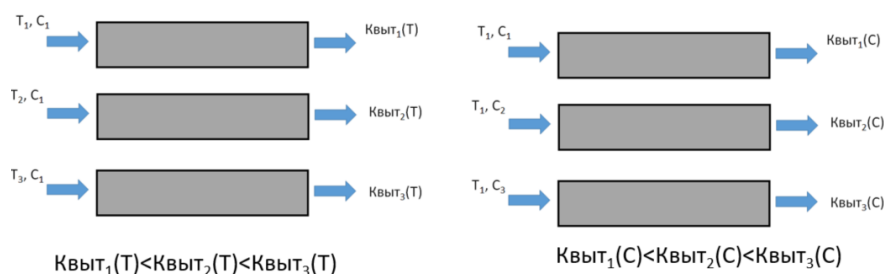


Рис. 3. Схема проведения экспериментов с различными концентрациями полимера и температурами на одном образце горной породы

Fig. 3. Scheme for conducting experiments with different polymer concentrations and temperatures on a single core sample

В случае планирования экспериментов таким образом, чтобы проводилось несколько измерений на одном образце, можно сократить количество используемых образцов в 3 раза (вместо 6 образцов 2).

Заключение

Планирование эксперимента и применение аппарата математической статистики позволило в 8 раз сократить количество петрофизических фильтрационных экспериментов для получения аппроксимационной интерполяционной зависимости между коэффициентом вытеснения нефти и 3 влияющими параметрами: концентрацией полимера, проницаемостью образца горной породы и температурой.

Предложена новая схема проведения экспериментов по вытеснению нефти из образцов керна оторочкой термополимера, позволяющая в 3 раза сократить количество образцов горной породы за счёт последовательного повышения коэффициента вытеснения нефти в экспериментах.

Показано, что ограниченный дискретный характер значений проницаемости образцов горной породы требует перехода в нормированное пространство значений влияющих параметров для формирования «ядерных» и «звёздных» точек ротатбельного центрально-композиционного плана 2 порядка.

Список источников

- Алибеков А. К., Михалев М. А. 2013. Практика применения планирования эксперимента: для инженеров и научных работников. Махачкала: ДГТУ. 126 с.
- Афанасьева Н. Ю. 2010. Вычислительные и экспериментальные методы научного эксперимента. М: КНОРУС. 336 с.
- Ахметжанова Г. В., Антонова И. В. 2016. Применение методов математической статистики в психолого-педагогических исследованиях. Тольятти: Издательство ТГУ. 147 с.
- Гильманов Я. И., Яценко В. М. 2023. Оценка пористости образцов керна из нетрадиционных коллекторов // Нефтяное хозяйство. № 11. С. 20–25. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-11-20-25>
- Зернин А. А., Макарова К. А., Тюлькова А. И. 2021. Особенности промыслово-геофизических и гидродинамических исследований горизонтальных многозабойных скважин на месторождениях ПАО «НК «Роснефть» // Нефтяное хозяйство. № 7. С. 94–98. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-7-94-98>
- Казаков А. В. 2014. Планирование эксперимента и измерение физических величин. Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политех. ун-та. 89 с.
- Мирзаджанзаде А. Х., Степанова Г. С. 1977. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа. М.: Недра. 228 с.
- Мостовой П. Я., Шакирзянов А. Н., Останков А. В., Севрюков Д. А., Ошмарин Р. А., Шакиров Р. Р., Григорьев Г. С., Токарева О. В., Гомульский В. В. 2021. Практика принятия решений о применении электроразведочных работ в различных геолого-геофизических условиях // Нефтяное хозяйство. № 2. С. 26–30. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-2-26-30>
- Мылтыкбаева Ж. К., Ковалева Г. Г. 2020. Метод ротатбельного центрального композиционного планирования эксперимента при изучении эффективности дезинфицирующих средств // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. Том 17. № 4. С. 54–65. <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/article/view/246> (дата обращения: 16.01.2025).
- Назарова Л. Н., Скоров Д. С. 2020. Комплексная технология воздействия на керогенсодержащие пласты баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. № 3. С. 14–17. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-3-14-17>
- Никитин О. Р. 2012. Теория планирования экспериментальных исследований. Владимир: Изд-во Владимирского гос. ун-та. 94 с.
- Никифоров А. И., Никаньшин Д. П. 1998. Перенос частиц двухфазным фильтрационным потоком // Математическое моделирование. Том 10. № 6. С. 42–52. <https://www.elibrary.ru/evjuqe>
- Санников Р. Х. 2010. Теория подобия и моделирования. Планирование инженерного эксперимента. Уфа: УГНТУ. 214 с.
- Andersen P. Ø. 2024. The role of core sample geometry on countercurrent spontaneous imbibition: mathematical foundation, examples, and experiments accounting for realistic geometries // SPE Journal. Vol. 29. No. 08. Pp. 4282–4304. <https://doi.org/10.2118/219776-PA>
- Box G. E. P., Draper N. R. 2007. Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses. 2nd ed. Hoboken: Wiley. 880 pp.

- da Nobrega Santos E., de Santana Neto D. C., de Magalhaes Cordeiro A. M. T., de Albuquerque Meireles B. R. L., da Silva Ferreira V. C., da Silva F. A. P. 2023. From waste to wonder: Unleashing the antimicrobial and antioxidant potential of acerola residue using a central composite rotatable design // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 11. No. 6. Article 111184. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111184>
- Danish M., Pin Z., Ziyang L., Ahmad T., Majeed S., Yahya A. N. A., Khanday W. A., Khalil H. P. S. A. 2022. Preparation and characterization of banana trunk activated carbon using H₃PO₄ activation: A rotatable central composite design approach // *Materials Chemistry and Physics*. Vol. 282. No. 5. Article 125989. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125989>
- Fisher R. A. 1971. *The Design of Experiments*. 9th ed. New York: Hafner Press. 256 pp.
- Jha A. K., Sit N. 2021. Comparison of response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN) modelling for supercritical fluid extraction of phytochemicals from Terminalia chebula pulp and optimization using RSM coupled with desirability function (DF) and genetic algorithm (GA) and ANN with GA // *Industrial Crops and Products*. Vol. 170. Article 113769. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113769>
- Jiang J., James S. C., Mojarab M. 2019. A multiphase, multicomponent reservoir-simulation framework for miscible gas and steam coinjection // *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. Vol. 23. No. 02. Pp. 551–565. <https://doi.org/10.2118/198905-PA>
- Jiang Q., He Z., Wang Y., Wang J. 2021. Optimizing the working performance of a boat-type tractor using central composite rotatable design and response surface method // *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 181. Article 105944. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105944>
- Kayaroganam P. 2021. *Response Surface Methodology in Engineering Science*. London: Intech Open. 270 pp. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90965>
- Rodrigues M. I., Iemma A. F. 2014. *Experimental Design and Process Optimization*. Boca Raton: CRC Press. 336 pp. <https://doi.org/10.1201/b17848>
- Saber W. I. A., El-Naggar N. E.-A., El-Hersh M. S., El-khateeb A. Y., Elsayed A., Eldadamony N. M., Ghoniem A. A. 2021. Rotatable central composite design versus artificial neural network for modeling biosorption of Cr⁶⁺ by the immobilized Pseudomonas alcaliphila NEWG-2 // *Scientific Reports*. Vol. 11. No. 1. Article 1717. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81348-8>
- Zaharia C., Suteu D. 2022. Empirical modeling and optimization by active central composite rotatable design: brilliant red HE-3B dye biosorption onto residual yeast biomass-based biosorbents // *Applied Sciences*. Vol. 12. No. 13. Article 6377. <https://doi.org/10.3390/app12136377>

References

- Alibekov, A. K., & Mikhalev, M. A. (2013). *The Practice of Using Experiment Planning: For Engineers and Scientists*. Dagestan State Technical University. [In Russian]
- Afanasieva, N. Yu. (2010). *Computational and Experimental Methods of Scientific Experiment*. KNORUS. [In Russian]
- Ahmetzhanova G. V., & Antonova I. V. (2016). *Application of mathematical statistics methods in psychological and pedagogical research*. TGU Publising. [In Russian]

- Gilmanov, Ya. I., & Yatsenko, V. M. (2023). Assessment of porosity of core samples from non-conventional reservoirs. *Oil Industry*, (11), 20–25. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-11-20-25> [In Russian]
- Zernin, A. A., Makarova, K. A., & Tyulkova, A. I. (2021). Features of production geophysical and hydrodynamic research of horizontal multilateral wells in the fields Rosneft Oil Company. *Oil Industry*, (7), 94–98. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-7-94-98> [In Russian]
- Kazakov, A. V. (2014). *Experiment Planning and Measurement of Physical Quantities*. Publishing House of Perm National Research Polytechnic University. [In Russian]
- Mirzajanzade, A. H., & Stepanova, G. S. (1977). *Mathematical Theory of Experiment in Oil and Gas Production*. Nedra. [In Russian]
- Mostovoy, P. Ya., Shakirzyanov, L. N., Ostankov, A. V., Sevryukov, D. A., Oshmarin, R. A., Shakirov, R. R., Grigoriev, G. S., Tokareva, O. V., & Gomulsky, V. V. (2021). Decision making practice of applying electromagnetic surveys in different geological areas and geophysical conditions. *Oil Industry*, (2), 26–30. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-2-26-30> [In Russian]
- Mylytkbaeva, Zh. K., & Kovaleva, G. G. (2020). Method of rotatable central composition planning of the experiment in the study of efficiency disinfectants. *Herald of the Kazakh-British Technical University*, 17(4), 54–65. Retrieved Jan. 16, 2025, from <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/article/view/246> [In Russian]
- Nazarova L. N., & Skorov, D. S. (2020). Integrated technology for influencing kero-gen-containing strata of the Bazhenov formation. *Oil Industry*, (3), 14–17. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-3-14-17> [In Russian]
- Nikitin, O. R. (2012). *Theory of Experimental Research Planning*. Vladimir State University Publishing House. [In Russian]
- Nikiforov, A. I., & Nikanshin D. P. (1998). Particle transfer by two-phase filtration flow. *Mathematical Modeling*, 10(6), 42–52. <https://www.elibrary.ru/evjuqe> [In Russian]
- Sannikov, R. Kh. (2010). *The Theory of Similarity and Modeling. Planning an Engineering Experiment*. Ufa State Petroleum Technological University. [In Russian]
- Andersen, P. Ø. (2024). The role of core sample geometry on countercurrent spontaneous imbibition: mathematical foundation, examples, and experiments accounting for realistic geometries. *SPE Journal*, 29(08), 4282–4304. <https://doi.org/10.2118/219776-PA>
- Box, G. E. P., & Draper, N. R. (2007). *Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses* (2nd ed.). Wiley.
- da Nobrega Santos, E., de Santana Neto, D. C., de Magalhaes Cordeiro, A. M. T., de Albuquerque Meireles, B. R. L., da Silva Ferreira, V. C., & da Silva, F. A. P. (2023). From waste to wonder: Unleashing the antimicrobial and antioxidant potential of acerola residue using a central composite rotatable design. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), Article 111184. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111184>
- Danish, M., Pin, Z., Ziyang, L., Ahmad, T., Majeed, S., Yahya, A. N. A., Khanday, W. A., & Khalil, H. P. S. A. (2022). Preparation and characterization of banana trunk activated carbon using H₃PO₄ activation: A rotatable central composite design approach. *Materials Chemistry and Physics*, 282(5), Article 125989. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125989>
- Fisher, R. A. (1971). *The Design of Experiments* (9th ed.). Hafner Press.

- Jha, A. K., & Sit, N. (2021). Comparison of response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN) modelling for supercritical fluid extraction of phytochemicals from *Terminalia chebula* pulp and optimization using RSM coupled with desirability function (DF) and genetic algorithm (GA) and ANN with GA. *Industrial Crops and Products*, 170, Article 113769. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113769>
- Jiang, J., James, S. C., & Mojarab, M. (2019). A multiphase, multicomponent reservoir-simulation framework for miscible gas and steam coinjection. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 23(02), 551–565. <https://doi.org/10.2118/198905-PA>
- Jiang, Q., He, Z., Wang, Y., & Wang, J. (2021). Optimizing the working performance of a boat-type tractor using central composite rotatable design and response surface method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181, Article 105944. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105944>
- Kayaroganam, P. (2021). *Response Surface Methodology in Engineering Science*. Intech Open. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90965>
- Rodrigues, M. I., & Iemma, A. F. (2014). *Experimental Design and Process Optimization*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17848>
- Saber, W. I. A., El-Naggar, N. E.-A., El-Hersh, M. S., El-khateeb, A. Y., Elsayed, A., Eldadamon, N. M., & Ghoniem, A. A. (2021). Rotatable central composite design versus artificial neural network for modeling biosorption of Cr⁶⁺ by the immobilized *Pseudomonas alcaliphila* NEWG-2. *Scientific Reports*, 11(1), Article 1717. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81348-8>
- Zaharia, C., & Suteu, D. (2022). Empirical modeling and optimization by active central composite rotatable design: brilliant red HE-3B dye biosorption onto residual yeast biomass-based biosorbents. *Applied Sciences*, 12(13), Article 6377. <https://doi.org/10.3390/app12136377>

Информация об авторах

Константин Михайлович Федоров, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра моделирования физических процессов и систем, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
k.m.fedorov@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0347-3930>

Александр Янович Гильманов, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра моделирования физических процессов и систем, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

a.y.gilmanov@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

Александр Павлович Шевелёв, кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
a.p.shevelev@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

Дарья Николаевна Гусева, главный специалист ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия
dnguseva72@rambler.ru

Information about the authors

Konstantin M. Fedorov, Dr. Sc. (Physics & Mathematics), Professor, Department of Modeling of Physical Processes and Systems, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia

k.m.fedorov@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0347-3930>

Alexander Ya. Gilmanov, Cand. Sc. (Physics & Mathematics), Associate Professor, Department of Modeling of Physical Processes and Systems, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia

a.y.gilmanov@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

Alexander P. Shevelev, Cand. Sc. (Physics & Mathematics), Associate Professor, Professor, Department of Modeling of Physical Processes and Systems, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia

a.p.shevelev@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

Daria N. Guseva, Chief specialist, Tyumen Petroleum Research Center LLC, Tyumen, Russia
dnguseva72@rambler.ru