

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВРЕМЕНИ НАБУХАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО СФОРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ ГЕЛЯ ОТ ВЛИЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ

К.М. Федоров^{1,*}, А.Я. Гильманов¹, В.А. Смирнов¹, А.П. Шевелёв¹, А.В. Кобышев²

¹ ФГАОУ «Тюменский государственный университет», РФ, Тюмень

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

Электронный адрес: k.m.fedorov@utmn.ru

Введение. В статье рассматриваются основные параметры предварительно сформированных частиц геля, закачиваемого в пласт для выравнивания фильтрационных потоков. Отмечается, что одной из важнейших характеристик для эффективного применения технологии является время набухания этих частиц. Подробное описание влияния параметров на время набухания значительно усложняет моделирование и требует существенных временных затрат, вследствие чего актуальным видится использование эмпирических корреляционных зависимостей, отображающих основные управляющие параметры.

Целью работы является исследование процесса набухания предварительно сформированных частиц геля и получение количественных зависимостей от основных влияющих факторов.

Материалы и методы. Предлагается методика для определения таких зависимостей, основанная на методе наименьших квадратов и предполагающая восполнение недостающих данных с использованием однопараметрических корреляционных полиномиальных зависимостей при фиксированном значении других параметров. Выделяются основные управляющие параметры — минерализация дисперсионной среды, её температура и средневзвешенный размер частиц в исходном состоянии. Осуществляется переход в безразмерное пространство для получения универсальных корреляций.

Результаты. Построена тернарная диаграмма для корреляционной зависимости безразмерного времени набухания от безразмерных управляющих параметров. Полученные зависимости аппроксимируют экспериментальные данные с удовлетворительной точностью.

Заключение. Предложенная методика получения корреляционных зависимостей позволяет сократить количество трудоёмких или нереализуемых экспериментальных исследований за счёт интерполяции имеющихся данных с сохранением порядка интерполяционного полинома. Установлено, что исходный средневзвешенный размер частиц влияет на время набухания в наибольшей степени по сравнению с концентрацией солей и температурой, причём с увеличением исходного средневзвешенного размера частиц время набухания увеличивается, поскольку частицы больших размеров необходимо поглотить больше воды.

Ключевые слова: предварительно сформированные частицы геля, ограничение водопритока, метод увеличения нефтеотдачи, корреляционные зависимости, время набухания, статистические методы, тернарные диаграммы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Для цитирования: Федоров К.М., Гильманов А.Я., Смирнов В.А., Шевелёв А.П., Кобышев А.В. Методика получения корреляционных зависимостей времени набухания предварительно сформированных частиц геля от влияющих параметров. ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2025;10(3):68–78. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2025-10-3-68-78>

Статья поступила в редакцию 16.04.2025

Принята к публикации 12.05.2025

Опубликована 29.09.2025

METHODOLOGY FOR OBTAINING CORRELATION DEPENDENCES OF THE SWELLING TIME
OF PREFORMED PARTICLE GEL ON THE INFLUENCING PARAMETERS

**Konstantin M. Fedorov^{1,*}, Aleksandr Ya. Gilmanov¹, Vladislav A. Smirnov¹, Aleksandr P. Shevelev¹,
Aleksandr V. Kobyshev²**

¹University of Tyumen, RF, Tyumen

²Tyumen Petroleum Research Center, RF, Tyumen

E-mail: k.m.fedorov@utmn.ru

Introduction. The article discusses the main parameters of preformed particle gel injected into the reservoir for conformance control. One of the most important characteristics for its effectiveness is the swelling time.

A detailed description of the effect of parameters on the swelling time requires significant time, because of which the use of empirical correlation dependencies is considered relevant.

The aim of the work is to study the swelling process of preformed particle gel and obtain quantitative dependencies on the main influencing factors.

Materials and methods. A methodology for determining such dependencies is proposed, based on the least squares method and containing the completion of missing data using one-parameter correlation polynomial dependencies with a fixed value of other parameters. The main control parameters are distinguished — the salt concentration, its temperature and the weighted average particle size in the initial state. The transition to a dimensionless form is carried out to obtain universal correlations.

Results. A ternary diagram is constructed for the correlation dependence of dimensionless swelling time on the dimensionless control parameters. The obtained dependences approximate the experimental data with satisfactory accuracy.

Conclusion. The proposed method for obtaining correlation dependencies reduces the number of experimental studies by interpolating the available data maintaining the interpolation polynomial order. It was found that the initial weighted average particle size affects the swelling time to the greatest extent compared with other parameters, and with an increase in the initial weighted average particle size, the swelling time increases, since a large particle needs to absorb more water.

Keywords: preformed particle gel, conformance control, enhanced oil recovery methods, correlation dependencies, swelling time, statistical methods, ternary diagrams

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Fedorov K.M., Gilmanov A.Ya., Smirnov V.A., Shevelev A.P., Kobayashv A.V. Methodology for obtaining correlation dependences of the swelling time of preformed particle gel on the influencing parameters. PRONEFT. Professionally about oil. 2025;10(3):68–78. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2025-10-3-68-78>

Manuscript received 16.04.2025

Accepted 12.05.2025

Published 29.09.2025

ВВЕДЕНИЕ

Как правило, гелеобразующие системы состоят из раствора полимера и водного раствора сшивателя (обычно используются полиакриламид как полимер и поливалентные металлы, такие как ацетат хрома, в качестве сшивателя). Основной проблемой использования этих систем для регулирования заводнения является то, что длинная цепь геля входит не во все поры, поэтому его проникновения затруднено и требует разрыва цепи. Одно из решений такой проблемы — создание геля внутри пласта, но это сопряжено с большими рисками, поскольку пластовые параметры могут быть распределены неоднородно и изменяться со временем [1]. Использование предварительно сформированных частиц геля (Preformed Particle Gel, PPG) с небольшими цепочками позволяет решить эту проблему. Преимуществом гелевых частиц перед обычными является их эластичность, что способствует более лёгкому их проникновению в пористую среду [2]. PPG снимает проблему смешивания оторочек реагентов для образования геля в нужном месте, поскольку поступает в пласт в виде частиц, взвешенных в воде, в т.ч. пластовой [1]. Вследствие обозначенных преимуществ указанных составов, к настоящему моменту времени накоплен значительный опыт промышленного применения технологии закачки предварительно

сшитых частиц геля для контроля обводнённости продукции [3, 4].

Основные стадии подготовки PPG следующие: создаётся водный раствор полимера, добавляется сшиватель, получившийся гель высушивается и измельчается в грануляционной мельнице.

В последнее время набирает популярность использование предварительно сформированных частиц геля, скрепляемых в пористой среде (Re-crosslinkable (Re-assembly) Preformed Particle Gel, RPPG) за счёт добавления дополнительного агента, скрепляющего несколько набухших частиц в одну, добавленного уже на стадии подготовки состава [5, 6]. Такая технология позволяет использовать при закачке частицы меньших размеров, которые при обычных условиях не способны удерживать воду в достаточной степени для блокирования поровых каналов из-за небольшой длины цепи, что важно для низкопроницаемых пластов. Кроме того, за счёт сшивания частиц RPPG применимы при блокировании сверхвысокопроницаемых каналов. Поэтому технология RPPG хорошо себя зарекомендовала в случае пластов с экстремально высокой степенью неоднородности проницаемости [5].

Отдельная технология предполагает использование PPG, устойчивых к прорыву углекислого газа [7].

Выделяют следующие механизмы блокирования пор PPG [2]: адсорбция частиц

на поверхности пористой среды, механическое удерживание при набухании, удерживание за счёт проникновения деформированной частицы в несколько поровых каналов. Тем не менее основной механизм удерживания обусловлен превышением размеров набухающих частиц размера поровых каналов [8–10]. Размер сухих частиц для их эффективного проникновения в пористую

С ЦЕЛЮ УСТАНОВЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАБУХАНИЯ ЧАСТИЦ ГЕЛЯ, ЗАКАЧИВАЕМЫХ В ПЛАСТ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ, ПРЕДЛОЖЕНА МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОТ ОСНОВНЫХ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ, ПОЗВОЛЯЮЩАЯ СОКРАТИТЬ КОЛИЧЕСТВО ТРУДОЁМКИХ ИЛИ НЕРЕАЛИЗУЕМЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА СЧЁТ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ИМЕЮЩИХСЯ ДАННЫХ С СОХРАНЕНИЕМ ПОРЯДКА ИНТЕРПОЛЯЦИОННОГО ПОЛИНОМА.

среду должен быть не более 0,7 от диаметра поровых каналов и составляет от 10 мкм до нескольких сантиметров (от 1 нм до 1 мм в случае RPPG) [3, 5, 7], и частицы сохраняют структуру до температур около 140 °С. Частицы больше 10 мкм условно называются большими. Частицы с размерами на порядки крупнее средних размеров поровых каналов в основном применяются при планировании мероприятий в карбонатных коллекторах [8, 9, 11], характеризующихся системой развитых трещин [12–15].

Закачка PPG в низкопроницаемых коллекторах сопряжена с разрушением частиц геля. Для борьбы с этим явлением применяются составы с «жёсткими» частицами, характеризующимися модулем упругости порядка 6500 Па [16].

На кинетику набухания частиц геля существенно влияет пластовая температура [17, 18]. На сегодня существуют реагенты, созданные для условий высоких и низких пластовых температур, — HSPPG (high-strength preformed particle gel) и LT-RPPG (Low Temperature-RPPG) соответственно. В случае anomalно высоких пластовых температур к реагенту на основе предварительно сшитых частиц геля добавляется диспергированная резина, минимизирующая эффект от разрушения геля [19, 20].

Рекомендуемая концентрация дисперсных частиц в суспензии в экспериментах Бая и его соавторов [10] варьировалась от 0,1 до 1%. После набухания частицы на практике увеличиваются в размерах в 2–200 раз [2, 21]. Для передовых

технологий время набухания составляет от 30 мин до 3 месяцев [7, 22]. Регулирование времени набухания достигается добавлением специальных реагентов, например натриевой соли 2-акриламида-2-метилпропансульфоновой кислоты (2-Acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid sodium salt, AMPS). Размер набухших частиц можно ограничивать добавлением солей [23, 24]. Поскольку реагент на основе PPG образует гель внутри пористой среды, он обладает высокой проникающей способностью даже в низкопроницаемые пропластки. Для предотвращения его попадания в эти пропластки и их блокирования проводится многостадийная закачка PPG различного размера [25]. На первом этапе в скважину подаётся реагент высокой концентрации с частицами большого размера под большим давлением, не превышающим давление разрыва пласта [26, 27]. В результате такого воздействия в низкопроницаемых пропластках вблизи скважины создаётся тонкий непроницаемый слой [28]. На втором этапе осуществляется закачка реагента с рабочей концентрацией PPG небольшого размера при невысоких забойных давлениях, обеспечивающих транспорт суспензии вглубь высокопроницаемых пропластков. Затем закачивается небольшое количество (около 0,5 м³) специального реагента (обычно кислоты) для разрушения непроницаемых участков в низкопроницаемых пропластках в призабойной зоне скважины, образованных на первом этапе [25, 29].

Применение PPG для выравнивания профиля приёмистости при использовании газовых методов увеличения нефтеотдачи требует учёта влияния концентрации углекислого газа на скорость набухания частиц геля [7, 30]. Для визуального исследования процесса проникновения PPG в неоднородную пористую среду используются специальные микрофлюидные чипы, представляющие собой корпус, выполненный из прозрачного материала, внутрь которого помещаются тонкие (около 1 см) образцы пористой среды, соединённые каналами с точкой подачи реагента [31]. Такие эксперименты позволяют визуализировать процесс селективного воздействия на неоднородную пористую среду и оценить его эффективность [22, 32].

Эффективные параметры PPG определяются фильтрационно-емкостными свойствами пластовой системы, которые могут быть определены либо в процессе проведения лабораторных экспериментов с чипами, количество которых ограничено, либо в результате физико-математического моделирования. Последнее позволяет провести

многовариантные расчёты и получить корреляционные зависимости между фильтрационно-емкостными свойствами и эффективными параметрами технологии закачки PPG. Существующие модели основаны на использовании подходов механики многофазных систем и физико-химической гидродинамики [29]. Массообмен компонентов описывается уравнениями неразрывности, записанными для каждого из них. Скорость фильтрационного потока определяется по закону Дарси с учётом остаточного фактора сопротивления, обусловленного набуханием PPG [29]. В качестве замыкающих соотношений используются эмпирические зависимости параметров флюида от концентрации частиц в реагенте. Такие модели могут быть трёхмерными, двумерными или одномерными. Преимуществом многомерных моделей является учёт изменения параметров пласта по горизонтали и вертикали. Однако для описания фильтрационных экспериментов с чипами использование трёхмерных моделей неоправданно из-за значительного времени расчётов и большого объёма входной информации. Оптимальным видится использование одномерных моделей для описания таких экспериментов. На сегодня существуют детально проработанные модели процессов ограничения водопритока с использованием гелевых и традиционных дисперсных систем. Моделирование задач с использованием реагента, содержащего PPG, требует учёта особенностей реологии, связанной с изменением размера частиц в процессе их взаимодействия с водой. Подробное описание таких процессов значительно усложняет моделирование и требует существенных временных затрат, вследствие чего актуальным видится использование эмпирических корреляционных зависимостей, отображающих основные управляющие параметры. Целью работы является исследование процесса набухания PPG и получение количественных зависимостей от основных влияющих факторов. Впервые получена многопараметрическая зависимость между временем набухания и минерализацией дисперсионной среды, её температурой и средневзвешенным размером частиц в исходном состоянии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эффективность применения технологии ограничения водопритока с использованием PPG во многом определяется кинетикой их набухания, на которую существенно влияют минерализация дисперсионной среды C и её температура T , а также средневзвешенный

размер частиц R [5, 7, 30]. В большинстве работ [5, 7, 30] проводится исследование влияния каждого параметра на кинетику набухания PPG в отдельности. Такие эксперименты позволяют установить количественные связи между этими параметрами и эффективностью увеличения объёма частиц, а также интерпретировать полученные результаты с точки зрения химической и физической природы процессов. Однако исследование влияния каждого параметра в отдельности исключает синергетические эффекты.

Трудоёмкость описанных экспериментов не позволяет провести измерения кинетики набухания PPG в широком диапазоне изменения выбранных параметров. Выходом из этой ситуации видится статистическое планирование эксперимента [33] и получение корреляционных зависимостей. Способы получения однопараметрических корреляционных зависимостей известны и запрограммированы в большинстве стандартных пакетов прикладных программ для анализа графиков, в то время как получение многопараметрических корреляционных зависимостей является нетривиальной задачей, поскольку требует учёта специфики моделируемого процесса. В распространённой теории ротатбельного или ортогонального центрально-композиционного планирования, как правило, используются полиномы второго порядка в качестве аппроксимирующих функций. В случае работы с уже имеющимися экспериментальными данными такие подходы не всегда дают положительный результат без предварительного планирования исследований. Поэтому в работе предлагается метод получения полиномиальной корреляционной зависимости высокого порядка, который определяется на основе анализа порядка малости эмпирических коэффициентов.

Для апробации этой методики необходим набор экспериментальных данных по исследованию влияния исходного средневзвешенного размера частиц реагента, температуры пористой среды и концентрации солей в дисперсионной среде на время набухания. В работах [5, 7, 30], выполненных под руководством Бая, получен ряд экспериментальных значений, приведенных в **табл. 1**.

Как видно из **табл. 1**, зависимость времени набухания от исследуемых параметров отличается высокой степенью неопределённости и неполноты набора экспериментальных данных. Поэтому необходима интерполяция этих данных для получения однопараметрических корреляционных зависимостей. Такие зависимости строятся по методу наименьших квадратов.

Таблица 1. Экспериментальные (выделены жирным шрифтом) и интерполированные значения времени набухания PPG [5, 7, 30]

Table 1. Experimental (bold) and interpolated values of the PPG swelling time [5, 7, 30]

$R, \text{ мм} / C, \%$		0,01	0,1	1	10	20
0,36	$T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$	3,11	3,10	3,00	2,33	2,31
	$T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	3,00	2,99	2,89	2,25	2,22
	$T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$	2,07	2,07	2,00	1,55	1,54
0,51	$T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$	8,30	8,27	8,00	6,22	6,19
	$T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	7,99	7,96	7,70	5,99	5,96
	$T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$	5,53	5,51	5,33	4,15	4,12
0,72	$T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$	15,56	15,50	15,00	11,67	11,59
	$T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	14,98	14,93	14,44	11,24	11,16
	$T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$	10,37	10,34	10,00	7,77	7,73
1,5	$T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$	28,00	28,00	27,00	21,00	20,00
	$T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	26,96	26,87	26,00	20,02	19,26
	$T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$	18,67	18,60	18,00	13,86	13,33

Первая корреляция получена для зависимости времени набухания от средневзвешенного размера частиц до набухания при температуре 23 °C и минерализации 1% и приведена на **рис. 1**. Уже квадратичная интерполяционная зависимость даёт коэффициент корреляции свыше 99%, поэтому нет необходимости учёта более высоких степеней в тренде, коэффициенты при которых имеют более высокий порядок малости. Уравнение такой зависимости имеет вид:

$$t = -15,522 R^2 + 50,077 R - 13,180, \quad (1)$$

где t — время набухания, ч, R — средневзвешенный размер частиц до набухания, мм.

Другие зависимости получены аналогичным образом.

Зависимости времени набухания от температуры при минерализации 1% и средневзвешенном размере частиц до набухания 1,5 мм (**рис. 2**) и от концентрации солей при температуре 23 °C и средневзвешенном размере частиц до набухания 1,5 мм имеют вид:

$$t = -0,006 T^2 + 0,333 T + 22,632, \quad (2)$$

$$t = 0,030 C^2 - 1,007 C + 28,031, \quad (3)$$

где t — время набухания, ч, T — температура, °C, C — концентрация солей, %.

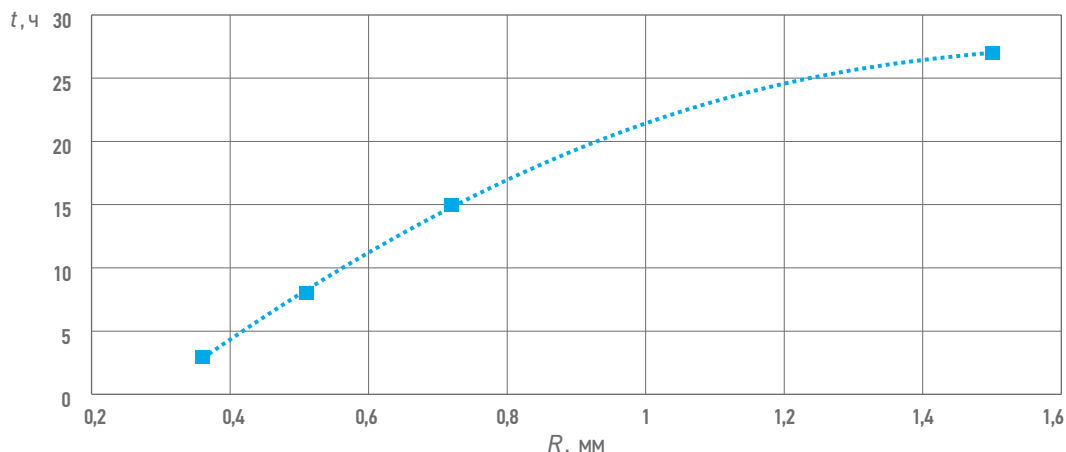


Рис. 1. Корреляционная зависимость времени набухания t от средневзвешенного размера частиц реагента до набухания R при температуре 23 °C и минерализации 1%. Составлено авторами

Fig. 1. Correlation dependence of swelling time t on the weighted average particle size in the initial state R at a temperature 23 °C and salt concentration 1%. Prepared by the authors

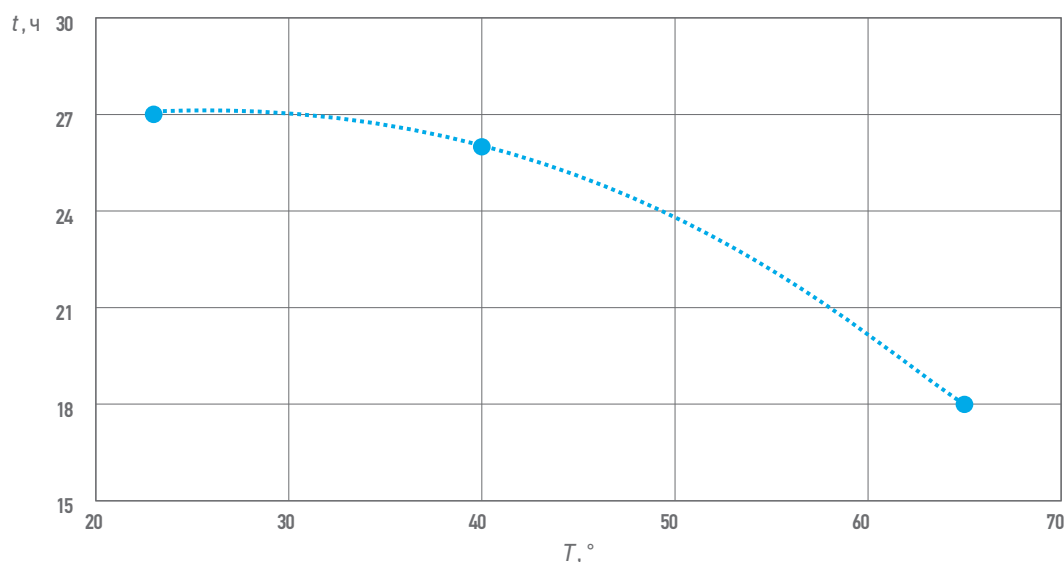


Рис. 2. Корреляционная зависимость времени набухания t от температуры T при минерализации 1% и средневзвешенном размере частиц до набухания 1,5 мм. Составлено авторами

Fig. 2. Correlation dependence of swelling time t on the temperature T at a salt concentration 1% and weighted average particle size 1,5 mm. Prepared by the authors

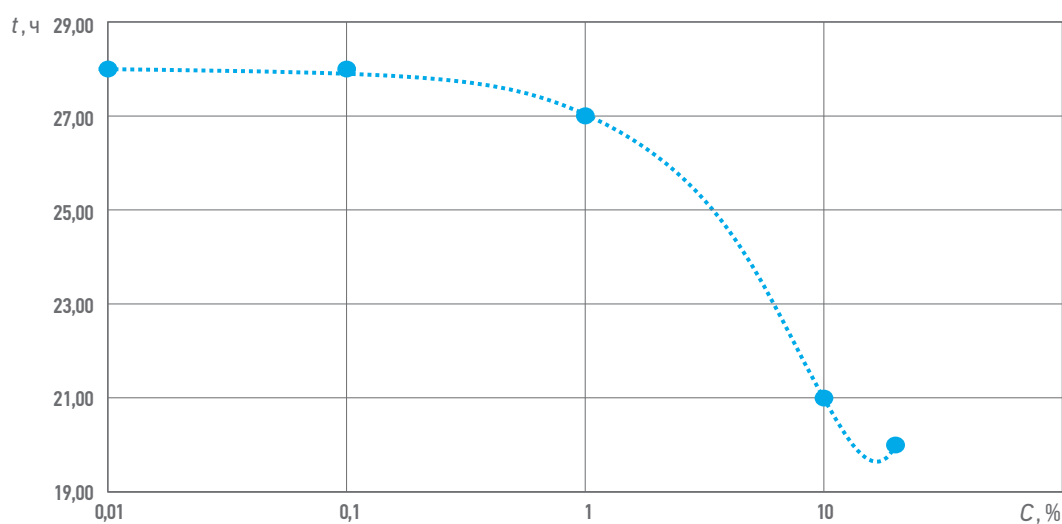


Рис. 3. Корреляционная зависимость времени набухания t от концентрации солей C при температуре 23 °С и средневзвешенном размере частиц до набухания 1,5 мм в логарифмическом масштабе. Составлено авторами

Fig. 3. Correlation dependence of swelling time t on the salt concentration C at a temperature 23 °С and weighted average particle size 1,5 mm on a logarithmic scale. Prepared by the authors

Коэффициент корреляции каждой зависимости (1)–(3) превышает 99%. К сожалению, в экспериментах температура варьировалась только для трёх значений: 23, 40, 65 °С (табл. 1). В таком случае данных для определения коэффициентов корреляционного полинома хватает только для второй степени (рис. 2), и сделать вывод о том, являются ли более точными в реальности зависимости более высокого порядка, не представляется возможным. Однако экспериментальных данных из табл. 1 достаточно, чтобы сделать вывод о достаточной точности параболических зависимостей времени набухания

от концентрации солей (рис. 3) и размера частиц (рис. 1).

Получение многопараметрической корреляционной зависимости методом ротатбельного центрально-композиционного планирования затруднено вследствие неполного и неравномерного охвата экспериментальными точками (табл. 1) диапазона изменения влияющих параметров. Поэтому предлагается методика получения такой зависимости, предполагающая восполнение недостающих данных с использованием однопараметрических корреляционных зависимостей при фиксированном значении двух других

параметров. Порядок такой однопараметрической зависимости выбирается таким же, как и у зависимостей, построенных для выборки с наибольшим количеством точек из имеющихся. В рассматриваемом случае это квадратичная зависимость (рис. 1–3). Интерполированные по такой методике значения приведены в табл. 1.

Предлагаемая методика предполагает построение многопараметрической зависимости с определением коэффициентов полинома методом Гаусса с опорой на точки, среди которых наибольшее количество составляют экспериментальные, а остальные точки берутся как можно ближе к ротатбельному центрально-композиционному планированию. Порядок многопараметрической зависимости принимается таким же, как и для однопараметрических зависимостей. В приведённом примере это полином 2-го порядка с учётом произведений двух параметров.

По характерному виду зависимости степени набухания частиц от времени можно предположить, что она имеет форму, близкую к натуральному логарифму. Для нахождения его коэффициентов можно использовать методы численной оптимизации. В результате такой процедуры получается зависимость вида:

$$V/V_0 = 10 \ln(t + 0,37) + 9,43, \quad (4)$$

которая аппроксимирует график этой зависимости с точностью 91,4% (рис. 4), где V/V_0 — отношение текущего объема к изначальному, t — время набухания, ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полином 2-го порядка, определяющий зависимость времени набухания предварительно сшитых частиц геля от концентрации солей, исходного размера этих частиц и температуры, рассчитанный по предлагаемой методике в соответствии с экспериментальными данными из табл. 1, имеет вид:

$$t = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 K_{ij} P_i P_j + \sum_{i=1}^3 K_i P_i, \quad (5)$$

где i, j — номера параметров (при $i = 1$ параметр $P_i = C$, при $i = 2$ $P_i = R$, при $i = 3$ $P_i = T$, аналогично для j), а значения коэффициентов K_i и K_{ij} приведены в табл. 2. Матрица коэффициентов K_{ij} является треугольной, чтобы учесть произведения двух параметров в корреляции только один раз.

Коэффициент корреляции такой зависимости 70 %, что объясняется небольшим и неравномерным набором экспериментальных данных (табл. 1).

Для оценки влияния параметров и визуализации полученных значений целесообразно осуществить переход в безразмерное пространство, независимыми координатами в котором являются нормированные концентрация солей ξ , средневзвешенный исходный размер частиц ρ и температура θ :

$$\xi = \frac{C - C_0}{C_1 - C_0}, \quad (6)$$

$$\rho = \frac{R - R_0}{R_1 - R_0}, \quad (7)$$

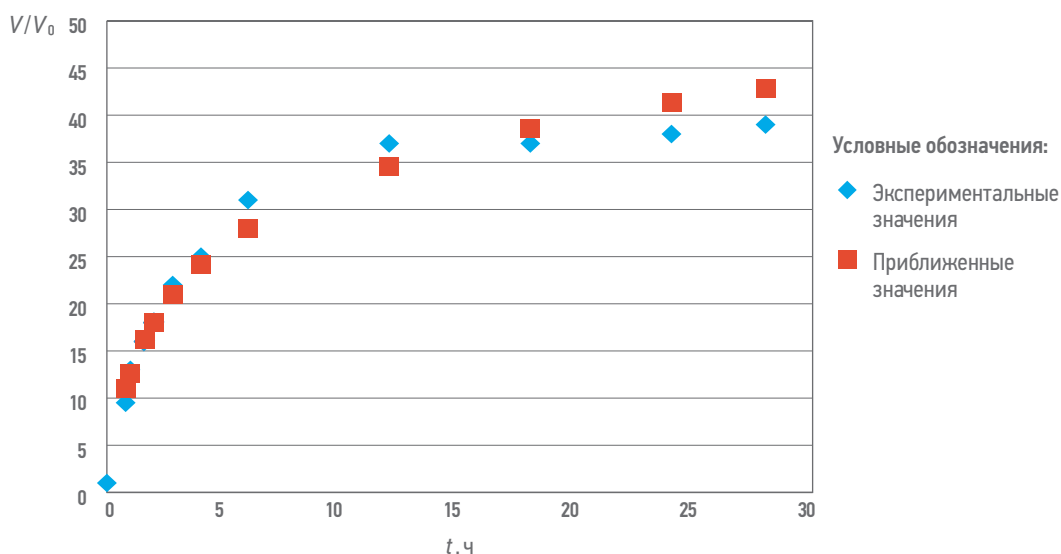


Рис. 4. Сопоставление приближенных значений степени набухания V/V_0 (4) с экспериментальными данными при температуре 23 °С и минерализации 1%, t — время набухания. Составлено авторами

Fig. 4. Comparison of approximate values of the swelling ratio V/V_0 (4) with experimental data at a temperature of 23 °C and salt concentration of 1%, t is the swelling time. Prepared by the authors

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляционной зависимости (5) при t в ч, C в %, R в мм, T в °C.

Составлено авторами

Table 2. Values of correlation coefficients (5) at t in h, C in %, R in mm, T in °C. Prepared by the authors

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение
K_1	-0,197	K_{22}	-4,322
K_{11}	0,034	K_{23}	-0,390
K_{12}	-0,591	K_3	-0,656
K_{13}	0,001	K_{33}	0,009
K_2	48,221		

Таблица 3. Значения коэффициентов корреляционной зависимости (10). Составлено авторами

Table 3. Values of correlation coefficients in (10). Prepared by the authors

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение
α_1	-0,196	α_{22}	-0,144
α_{11}	0,349	α_{23}	-0,422
α_{12}	-0,345	α_3	-0,373
α_{13}	0,022	α_{33}	0,308
α_2	1,056	α_0	0,080

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0}, \quad (8)$$

где C_0, R_0, T_0 и C_1, R_1, T_1 — минимальные и максимальные значения концентрации солей, средневзвешенного исходного размера частиц и температуры соответственно. Безразмерное время τ вводится путём деления на характерное время t_0 , в качестве которого выбирается наибольшее из расчётных значений:

$$\tau = \frac{t}{t_0}. \quad (9)$$

С учётом (6)–(9) корреляционная зависимость (5) в безразмерном пространстве принимает вид:

$$\tau = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \alpha_{ij} \pi_i \pi_j + \sum_{i=1}^3 \alpha_i \pi_i + \alpha_0, \quad (10)$$

где при $i = 1$ параметр $\pi_i = \xi$, при $i = 2$ $\pi_i = \rho$, при $i = 3$ $\pi_i = \theta$, аналогично для j , а коэффициенты α_0, α_i и α_{ij} связаны с коэффициентами зависимости (5) по формулам:

$$\alpha_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 K_{ij} P_{i0} P_{j0} + \sum_{i=1}^3 K_i P_{i0}}{t_0}, \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \frac{C_1 - C_0}{t_0} (K_1 + 2 K_{11} C_0 + K_{12} R_0 + K_{13} T_0), \quad (12)$$

$$\alpha_2 = \frac{R_1 - R_0}{t_0} (K_2 + 2 K_{22} R_0 + K_{12} C_0 + K_{23} T_0), \quad (13)$$

$$\alpha_3 = \frac{T_1 - T_0}{t_0} (K_3 + 2 K_{33} T_0 + K_{13} C_0 + K_{23} R_0), \quad (14)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{K_{ij} (P_{i1} - P_{i0})(P_{j1} - P_{j0})}{t_0}, \quad j \geq i, \quad (15)$$

где при $i = 1$ параметр $P_{i0} = C_0, P_{i1} = C_1$, при $i = 2$ $P_{i0} = R_0, P_{i1} = R_1$, при $i = 3$ $P_{i0} = T_0, P_{i1} = T_1$, аналогично для j .

Значения коэффициентов α_0, α_i и α_{ij} , рассчитанные по формулам (11)–(15), приведены в **табл. 3**.

В случае трёх независимых параметров функциональная зависимость (10) представляет собой гиперповерхность в четырёхмерном пространстве, изображение которой в евклидовой геометрии не представляется возможным, что затрудняет анализ полученных результатов. Однако в частном случае, когда сумма независимых переменных равна 1, визуализация полученной зависимости (10) возможна с использованием тернарных диаграмм (**рис. 5**). На такой диаграмме по сторонам равностороннего треугольника отложены значения одного из параметров. Вершины соответствуют максимальному значению рассматриваемого параметра, равному 1. Согласно свойствам равностороннего треугольника, сумма перпендикуляров к его сторонам, проведённых из одной точки, равна высоте. Поскольку сумма параметров принята равной 1, то и сумма перпендикуляров тоже равна 1, поэтому длины этих перпендикуляров соответствуют значениям параметров, при которых получена иллюстрируемая точка. Значение безразмерного времени набухания

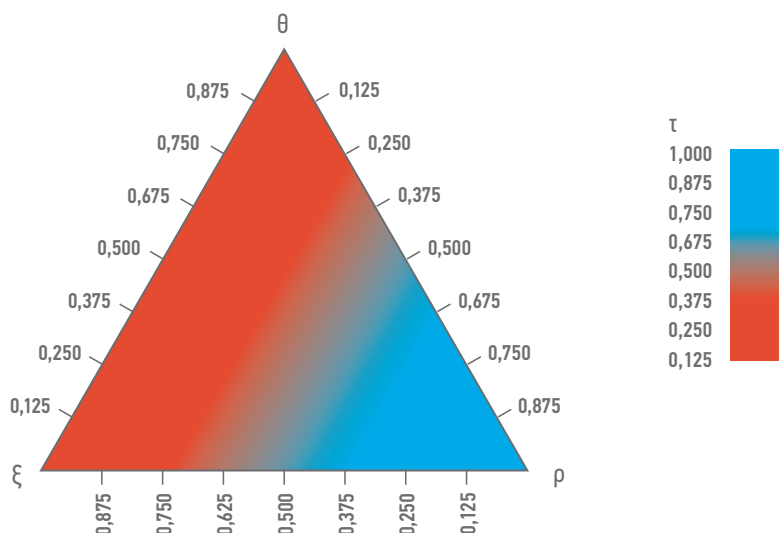


Рис. 5. Тернарная диаграмма для корреляционной зависимости безразмерного времени набухания от безразмерных параметров ξ , ρ , θ при их сумме, равной 1. Составлено авторами

Fig. 5. Ternary diagram for the correlation dependence of the dimensionless swelling time on the dimensionless parameters ξ , ρ , θ with their sum equal to 1. Prepared by the authors

на этой диаграмме удобно изобразить с помощью цветовой палитры для всех точек, где синий цвет соответствует максимальному значению времени, красный — минимальному (рис. 5).

Из тернарной диаграммы (рис. 5) следует, что на значение безразмерного времени набухания преимущественно влияет исходный средневзвешенный размер частиц, в то время как другие параметры влияют слабо по сравнению с ρ . Этот параметр связан с коэффициентом фильтрации λ , характеризующимся соотношением средневзвешенных размеров частиц и поровых каналов [34] и показывающим интенсивность удерживания этих частиц в пористой среде. В свою очередь, коэффициент фильтрации является ключевым параметром в модели глобального проникновения частиц в пористую среду, характеризующим эффективность

выравнивания профилей приёмистости в слоисто-неоднородной пористой среде. Поэтому полученная функциональная зависимость (10) впоследствии может быть использована при прогнозировании эффективности описанной технологии.

С увеличением исходного средневзвешенного размера частиц время набухания увеличивается (рис. 5), поскольку частицы больших размеров необходимо поглотить больше воды.

Выводы

В результате проведённого исследования можно сделать следующие выводы.

1. Предложена методика получения корреляционных зависимостей, позволяющая сократить количество трудоёмких или не реализуемых экспериментальных исследований за счёт интерполяции имеющихся данных с сохранением порядка интерполяционного полинома.
2. Показано, что переход в безразмерное пространство позволяет визуализировать в виде тернарных диаграмм функциональные зависимости от трёх независимых переменных при их фиксированном суммарном значении.
3. Определено, что имеющиеся экспериментальные данные аппроксимируются корреляционными зависимостями второго порядка с точностью 99% для однопараметрических зависимостей и 70% для многопараметрической функции.
4. Установлено, что исходный средневзвешенный размер частиц влияет на время набухания в наибольшей степени по сравнению с концентрацией солей и температурой, причём с увеличением исходного средневзвешенного размера частиц время набухания увеличивается, поскольку частицы больших размеров необходимо поглотить больше воды.

Список литературы / References

1. Salehi M.B., Moghadam A.S., Jarrahian K. Effect of network parameters of preformed particle gel on structural strength for water management. *SPE Production and Operations*. 2020, vol. 35, no. 2, pp. 362–372. <https://doi.org/10.2118/193631-PA>
2. Wu D., Zhou K., An Z., Jian H. *Experimental study on the matching relationship between ppg size and reservoir heterogeneity*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-193709-MS presented at the SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition, Kuwait City, Kuwait, December 2018. <https://doi.org/10.2118/193709-MS>
3. Bai B., Wei M., Yuzhang L. *Field and lab experience with a successful preformed particle gel conformance control technology*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-164511-MS presented at the SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, USA, March 2013. <https://doi.org/10.2118/164511-MS>
4. Bai B., Huang F., Liu Y., Seright R.S., Yefei W. *Case study on preformed particle gel for in-depth fluid diversion*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE 113997 presented at the SPE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, USA, April 2008. <https://doi.org/10.2118/113997-MS>
5. Pu J., Bai B., Alhuraishawy A., Schuman T., Chen Y., Xindi S. *A novel re-crosslinkable preformed particle gel for conformance control in extreme heterogeneous reservoirs*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-191697-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA, September 2018. <https://doi.org/10.2118/191697-MS>
6. Zhao S., Al B.A., Liu J., Bai B., Thomas S. Coreflooding evaluation of fiber-assisted recrosslinkable preformed particle gel using an open fracture model. *SPE Journal*. 2023, vol. 28, pp. 268–278. <https://doi.org/10.2118/212282-PA>

7. Bai B., Xindi S. *Development of swelling-rate controllable particle gels to control the conformance of CO₂ flooding*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-200339-MS presented at the SPE Improved Oil Recovery Conference, Virtual, August 2020. <https://doi.org/10.2118/200339-MS>
8. Almakimi A.A., Liu J., Bai B., Ibelwaleed A.H. Investigation of carbonate matrix damage and remediation methods for preformed particle gel conformance control treatments. *SPE Journal*. 2024, vol. 29, pp. 1623–1634. <https://doi.org/10.2118/210311-PA>
9. Cao D., Almohsin A., Han M., Bader A. *Mixed preformed particle gel system for water shutoff in fractured carbonate reservoir*. Society of Petroleum Engineers conference paper IPTC-23006-MS presented at the International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand, March 2023. <https://doi.org/10.2523/IPTC-23006-MS>
10. Bai B., Liu Y., Coste J. -P., Liangxiong L. Preformed particle gel for conformance control: transport mechanism through porous media // *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. 2007, vol. 10, pp. 176–184. <https://doi.org/10.2118/89468PA>
11. Imqam A., Bai B., Mojdeh D. *Preformed particle gel propagation through super-k permeability sand and its resistance to water flow during conformance control*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-176429-MS presented at the SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Nusa Dua, Bali, Indonesia, October 2015. <https://doi.org/10.2118/176429-MS>
12. Fakher S., Bai B., Imqam A., Yanling W. *Novel mathematical models to predict preformed particle gel placement and propagation through fractures*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-187152-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, October 2017. <https://doi.org/10.2118/187152-MS>
13. Imqam A., Wang Z., Bai B., Mojdeh D. *Effect of heterogeneity on propagation, placement, and conformance control of preformed particle gel treatment in fractures*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-179705-MS presented at the SPE Improved Oil Recovery Conference, Tulsa, Oklahoma, USA, April 2016. <https://doi.org/10.2118/179705-MS>
14. Zhang H., Baojun B. Preformed-particle-gel transport through open fractures and its effect on water flow. *SPE Journal*. 2011, vol. 16, pp. 388–400. <https://doi.org/10.2118/129908-PA>
15. Alotibi A., Song T., Bai B., Schuman T.P. *Transport and plugging performance evaluation of a novel re-crosslinkable microgel used for conformance control in mature oilfields with super-permeable channels*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-215168-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, October 2023. <https://doi.org/10.2118/215168-MS>
16. Elsharafi M.O., Baojun B. *Effect of strong preformed particle gel on unswept oil zones/areas during conformance control treatments*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-164879-MS presented at the EAGE Annual Conference & Exhibition incorporating SPE Europe, London, UK, June 2013. <https://doi.org/10.2118/164879-MS>
17. Hu Y., Bai Y., Sun J., Kaihe L. Experimental study of the swelling and rheological properties of a high-strength preformed particle gel lost circulation material. *SPE Journal*. 2024, vol. 29, pp. 3924–3941. <https://doi.org/10.2118/221465-PA>
18. Ahdaya M., Al B.A., Bai B., Thomas S. Low-temperature recrosslinkable preformed particle gel as a material for lost circulation control. *SPE Journal*. 2022, vol. 27, pp. 2541–2551. <https://doi.org/10.2118/209783-PA>
19. Sun L., Li D., Pu W., Li L., Bai B., Han Q., Zhang Y., Ximing T. Combining preformed particle gel and curable resin-coated particles to control water production from high-temperature and high-salinity fractured producers. *SPE Journal*. 2020, vol. 25, pp. 938–950. <https://doi.org/10.2118/198887-PA>
20. Long Y., Yu B., Changqian Z. *Conformance improvement for ultra-high-temperature reservoir: a comparative study between hydrostable and conventional preformed particle gel*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE192738-MS presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2018. <https://doi.org/10.2118/192738-MS>
21. Goudarzi A., Alhuraishawy A., Taksaudom P., Sepehrnoori K., Bai B., Imqam A., Mojdeh D. *Experimental and simulation study of water shutoff in fractured systems using microgels*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-180388-MS presented at the SPE Western Regional Meeting, Anchorage, Alaska, USA, May 2016. <https://doi.org/10.2118/180388-MS>
22. Bai B., Schuman T., Smith D., Tao S. *Lessons learned from laboratory study and field application of re-crosslinkable preformed particle gels RPPG for conformance control in mature oilfields with conduits/fractures/fracture-like channels*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-218133-MS presented at the SPE Improved Oil Recovery Conference, Tulsa, Oklahoma, USA, April 2024. <https://doi.org/10.2118/218133-MS>
23. Alhuraishawy A.K., Sun X., Bai B., Wei M., Imqam A., Almansour A., King A. *Improve plugging efficiency in fractured sandstone reservoirs by mixing different preformed particles gel size*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE188023-MS presented at the SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia, April, 2017. <https://doi.org/10.2118/188023-MS>
24. Panthi K., Kishore K.M. *Salinity-sensitive polymeric particles for EOR*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-179627-MS presented at the SPE Improved Oil Recovery Conference, Tulsa, Oklahoma, USA, April 2016. <https://doi.org/10.2118/179627-MS>
25. Bai B., Li L., Liu Y., Liu H., Wang Z., Chunmei Y. Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and applications. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. 2007, vol. 10, pp. 415–422. <https://doi.org/10.2118/89389-PA>
26. Imqam A., Bai B., Al R.M., Wei M., Delshad M., Kamy S. *Preformed particle gel extrusion through open conduits during conformance control treatments*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-169107-MS presented at the SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, April 2014. <https://doi.org/10.2118/169107-MS>
27. Zhou K., Hou J., Wu D., Qingjun D. *Study on flow diversion caused by deformable preformed particle gel*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-192965-MS presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2018. <https://doi.org/10.2118/192965-MS>
28. Almakimi A.A., Liu J., Bai B., Ibelwaleed A.A.H. *Investigation of matrix damage and remediation methods of preformed particle gel conformance control treatments in carbonate reservoirs*. Society of Petroleum Engineers conference paper SPE-210311-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, 2022. <https://doi.org/10.2118/210311-MS>
29. Imqam A., Bai B., Wei M., Elue H., Farag A.M. Use of hydrochloric acid to remove filter-cake damage from preformed particle gel during conformance-control treatments. *SPE Journal*. 2016, vol. 31, pp. 247–257. <https://doi.org/10.2118/172352-PA>
30. Wang Z., Bai B., Long Y., Lizhu W. An investigation of CO₂-responsive preformed particle gel for conformance control of CO₂ flooding in reservoirs with fractures or fracture-like channels. *SPE Journal*. 2019, vol. 24, pp. 2398–2408. <https://doi.org/10.2118/197046-PA>
31. Fialips C.I., Labeyrie B., Burg V., Maziere V., Munerel Y., Haurie H., Jolivet I., Lasnel R., Laurent J., Lambert L., Laurence J. *Quantitative mineralogy of vaca muerta and alum shales from core chips and drill cuttings by calibrated SEM-EDS mineralogical mapping*. SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology conference paper URTEC-2018-2902304 presented at the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2018. <https://doi.org/10.15530/URTEC-2018-2902304>
32. Roslan A.A., Aziz N.A.A., Dzulkarnain I., Tewari R.D., Jaafar M.Z. Experimental investigation on the performance of polymer-coated clay/polyacrylamide hydrogel for water shutoff treatment. *SPE Journal*. 2023, 38, pp. 490–503. <https://doi.org/10.2118/214662-PA>

33. Fisher R.A. *The design of experiments*. 9th edition. Royal Oak: Hafner Press, 1971. 256 p.
34. Vaz A., Bedrikovetsky P., Fernandes P.D., Badalyan A., Carageorgos T. Determining model parameters for non-linear deep-bed filtration using laboratory pressure measurements. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017, vol. 151, pp. 421–433. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.001>

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

К.М. Федоров — формулировка проблемы, разработка концепции статьи.

А.Я. Гильманов — получение многопараметрических корреляционных зависимостей.

В.А. Смирнов — получение однопараметрических корреляционных зависимостей.

А.П. Шевелёв — разработка методики получения корреляционных зависимостей.

А.В. Кобяшев — анализ экспериментальных исследований процесса.

Konstantin M. Fedorov — the formulation of the problem, development of the paper concept.

Aleksandr Ya. Gilmanov — obtaining multiparametric correlation dependencies.

Vladislav A. Smirnov — obtaining single-parameter correlation dependencies.

Aleksandr P. Shevelev — formulation of the methodology of correlation dependencies obtaining.

Aleksandr V. Kobyashev — analysis of the experimental investigations of the process.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Константин Михайлович Федоров* — доктор физико-математических наук, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем, ФГАОУ «Тюменский государственный университет», 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6. e-mail: k.m.fedorov@utmn.ru

Александр Янович Гильманов — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры моделирования физических процессов и систем, ФГАОУ «Тюменский государственный университет»

Владислав Антонович Смирнов — студент бакалавриата кафедры моделирования физических процессов и систем, ФГАОУ «Тюменский государственный университет»

Александр Павлович Шевелёв — кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем, ФГАОУ «Тюменский государственный университет»

Александр Вячеславович Кобяшев — главный менеджер, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

Konstantin M. Fedorov* — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Professor of the Department of Modeling of Physical Processes and Systems, University of Tyumen
6, Volodarskogo str., 625003, Tyumen, Russia.
e-mail: k.m.fedorov@utmn.ru

Aleksandr Y. Gilmanov — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Modeling of Physical Processes and Systems, University of Tyumen

Vladislav A. Smirnov — Bachelor student, Department of Modeling of Physical Processes and Systems, University of Tyumen

Aleksandr P. Shevelev — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Professor of the Department of Modeling of Physical Processes and Systems, University of Tyumen

Aleksandr V. Kobyashev — Senior manager, Tyumen Petroleum Research Center

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author