

## Исследование подвижности дисперсных гелей полимерно-гелевой системы «Темпоскрин»

**В.Б. Демьяновский**

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия  
E-mail: demian20@yandex.ru

**Аннотация.** В статье приводится описание методики оптико-электронного наблюдения за процессом седиментации гелевых частиц в полимерно-гелевой системе. Представлен анализ особенностей гидродинамического движения гелевых частиц при ламинарном и турбулентном режимах реализации технологии «Темпоскрин» для увеличения добычи нефти. Рассмотрено влияние гидродинамических условий на подвижность полимерно-гелевой системы в скважинных и пластовых условиях, включая распределение дисперсной гелевой фазы в пласте. Представлена модель управления потоками флюидов в нефтяном пласте подвижной полимерно-гелевой системой «Темпоскрин» на основе положений теории графов.

**Ключевые слова:** нефтедобыча, дисперсный гель, нефелометрия, цифровая камера, цифровая фотография, нефтяной пласт, теория графов.

**Для цитирования:** Демьяновский В.Б. Исследование подвижности дисперсных гелей полимерно-гелевой системы «Темпоскрин» // Актуальные проблемы нефти и газа. 2021. Вып. 3(34). С. 21–34. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-34.art2>

С начала 90-х годов прошлого века семейство дисперсных полимерно-гелевых систем (ПГС) – «Темпоскрин» в различных модификациях успешно применяется для увеличения добычи нефти посредством обработки нагнетательных и добывающих скважин [1–3]. Приготовление ПГС производится путем смешения реагента «Темпоскрин» с пластовой водой перед закачкой в пласт. Реагенты, образующие дисперсные гели при смешении с водой, иногда называют водонабухающими полимерами.

Аналоги подобных систем в англоязычной литературе получили название «предварительно сформированные гелевые частицы» [4, 5]. Среди указанных систем следует выделить модифицированную ПГС Темпоскрин» на основе реагента «Темпоскрин-Плюс», отличающуюся повышенной термической стабильностью.

По своей структуре система представляет собой грубые дисперсии полимерных гелей в воде размером 1–10 мм. Механические свойства гелевых частиц характеризуются сравнительно небольшим модулем упругости величиной 0,5–2 кПа.

Реагент «Темпоскрин» – это порошок анионного полиакриламида, сшитый в твердое состояние ионизирующим излучением [1]. При контакте с водой данный полимер образует дисперсную систему, состоящую из частиц геля миллиметрового размера и воды. Система в статических условиях оказывается седиментационно неустойчивой вследствие большого размера частиц и плотности, более высокой, чем вода. С другими твердыми поверхностями и между собой гелевые частицы практически не взаимодействуют. Поэтому после осаждения они могут быть переведены во взвешенное состояние за счет перемешивания.

Одновременно установлено, что наличие гелевых частиц в воде создает значительное гидродинамическое сопротивление при продавливании смеси через каналы размером менее 1 мм.

Эти особенности объясняют связь физико-механических свойств полимерно-гелевой системы с гидродинамическими режимами ее движения, структурой пластовых каналов фильтрации. Данные свойства делают уникальной технологию на основе ПГС «Темпоскрин» среди физико-химических методов повышения нефтеотдачи как систему с пассивной добавкой к воде. Несмотря на пассивность добавки, она оказывает влияние на фильтрацию в пластовых условиях. Механизм влияния раскрывается ниже.

В работе [6] явление сорбции активных примесей на поверхности породы отнесено к основной проблеме повышения эффективности физико-химических методов разработки нефтяных месторождений.

Это утверждение обосновывается следующим: активная примесь теряется в процессе сорбции на ограниченном расстоянии от скважины и слабо влияет на процессы в глубине пласта. В отличие от модификаторов воды, имеющих повышенную сорбцию к породе, частицы дисперсных гелей «Темпоскрин» не взаимодействуют ни с породой пласта, ни друг с другом. В связи с этим движение гелевых частиц происходит независимо друг от друга, если объем, занимаемый гелем в ПГС, относительно невелик. При увеличении концентрации гелевых частиц, например, в процессе седиментации в виде осадка или в узком поровом канале, движение гелевых частиц может оказывать взаимное влияние и создавать повышенное гидродинамическое сопротивление фильтрации воды в пласте.

Предлагаемый в настоящей работе подход предполагает наличие подвижных гелей миллиметрового размера в пластовых условиях. Частицы гелей подобного размера намного больше размера пор большинства нефтяных коллекторов и не могут в них проникнуть, однако в техногенных трещинах, а также высокопроницаемых участках пласта они двигаются с потоком воды, создавая дополнительное гидравлическое сопротивление.

В реальных промысловых условиях размер каналов, по которым нагнетается вода в пласт, имеет некоторое распределение по размерам, которое, как правило, заранее неизвестно. Тем не менее направление движения частиц гелей в пласте должно происходить преимущественно с потоками водной фазы полимерно-гелевой системы по каналам с более высокой гидропроводностью. За счет механического удержания в процессе движения ПГС по каналам с переменным сечением может происходить увеличение локальной концентрации частиц, повышающее гидродинамическое сопротивление, что в итоге приведет к выравниванию профиля притока нагнетаемой в пласт воды.

В связи с актуальностью для нефтедобычи влияния размера гелевых частиц на скорость их движения и следующей за ними воды в пластовых условиях, представляется важным более подробное изучение подвижности гелевых частиц ПГС «Темпоскрин» и разработка физико-химической модели, объясняющей положительное действие этой системы на процесс добычи нефти в сравнении с технологиями, использующими хорошо сорбирующиеся активные примеси к закачиваемой в пласт воде.

### Экспериментальная часть

Эксперимент состоит из двух частей.

В первой части представлены результаты исследования подвижности гелевых частиц ПГС при их седиментации методом оптико-электронного наблюдения.

Во второй рассматривается моделирование механизма действия полимерно-гелевой системы «Темпоскрин» в технологическом процессе добычи нефти на основе теории графов.

#### **Часть 1. Исследование подвижности дисперсных гелей ПГС «Темпоскрин» методом оптико-электронного наблюдения в процессе седиментации**

Полимерно-гелевые системы «Темпоскрин»/«Темпоскрин-Плюс» после своего приготовления остаются стабильными в отношении объема и числа гелевых частиц во времени. До 90% объема системы занимает дисперсный гель, а остальной объем – дисперсионная среда с вязкостью, близкой к вязкости воды. Вследствие немного большей плотности гелевых частиц по сравнению с плотностью дисперсионной среды, в статических условиях наблюдается их оседание с образованием осадка геля. Однако в условиях движения дисперсионной среды распределение частиц по объему зависит также и от гидродинамического режима течения. Последний при движении жидкости по каналам принято определять [7] по числу Рейнольдса:

$$Re = DU/\nu, \quad (1)$$

где

$D$  – характерный размер диаметра трубки, м;

$U$  – скорость течения, м/с;

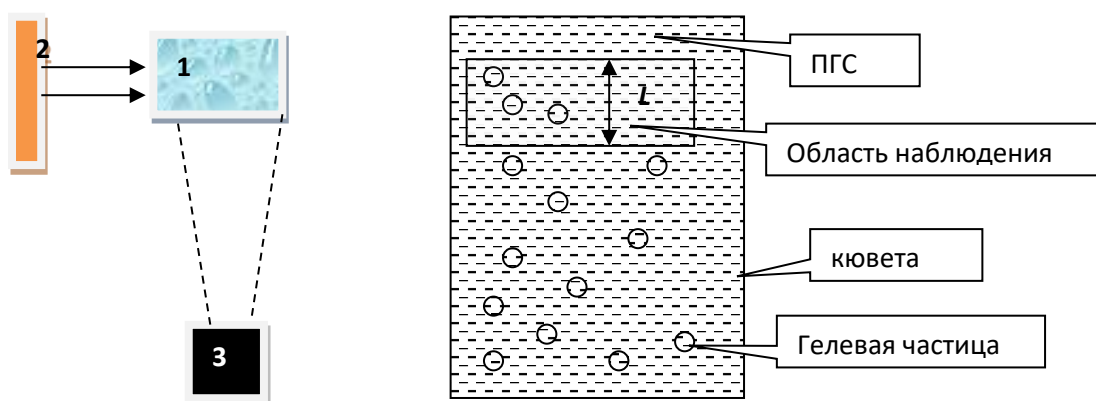
$\nu$  – кинематическая вязкость флюида, м<sup>2</sup>/с.

Режим течения ПГС в стволе скважины при реализации технологии на основе реагента «Темпоскрин» следует оценивать по реальным промышленным данным и вязкости дисперсной среды полимерно-гелевой системы.

Например, для характерного радиуса скважины 0,1 м, скорости закачки ПГС в скважину 10 м<sup>3</sup>/час (0,28 м/с), кинематической вязкости воды  $1 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с получается значение числа Рейнольдса  $Re = 2800$ . Это значение превышает критическую величину 2300, что указывает на турбулентный режим течения жидкости в трубе. Соответственно, частицы гелей ПГС при закачке в скважину будут вовлекаться вихревым течением жидкости [7] во взвешенном состоянии, а при планировании закачки полимерно-гелевой системы можно ориентироваться на закачку воды без примеси.

При контакте с пластом скорость движения воды снижается, режим течения переходит в ламинарный, при котором гелевые частицы оседают, образуя массив из частиц. Вследствие своей раздробленности указанный массив удерживается в малых порах пласта силой упругости гелей. В более крупных порах (трещинах) этой силы оказывается недостаточно и поэтому отдельные гелевые частицы сохраняют свою подвижность.

При лабораторном исследовании подвижности гелевых частиц ПГС использована схема оптико-электронного наблюдения свободного осаждения частиц геля в прозрачной стеклянной кювете. Соответствующая схема приведена на рис. 1.



1 – кювета с ПГС, 2 – боковой осветитель, 3 – цифровая камера,  
 $L$  – высота слоя области наблюдения

**Рис. 1.** Схема видео-электронного наблюдения седиментации гелей и выделение области наблюдения на цифровой фотографии кюветы

Метод представляет собой комбинацию метода нефелометрии [8–10] в сочетании с методом цифровой фотографии. Последующий анализ цифровой фотографии осуществляется на основе принципов фотограмметрии [11]. От нефелометрии использована боковая подсветка кюветы с образцом ПГС, а от фотограмметрии – приемы обработки цифровых изображений. Обработка и анализ результатов в цифровом формате проведены с использованием программного обеспечения ImageJ [12].

Возможность регистрации гелевых частиц дисперсных гидрогелей основана на рассеивании света на границе гель–вода. Наиболее распространенный вариант нефелометрии использует боковую подсветку кювет, а интенсивность рассеянного света измеряется под углом 90 градусов к линии хода световых лучей с применением одного или двух фотометрических датчиков. Интенсивность рассеяния света в методе нефелометрии зависит от интенсивности падающего света и количества центров рассеяния. Последний параметр пропорционален числу

гелевых частиц за вычетом фонового рассеяния.

Использование цифровой камеры для записи рассеянного света позволяет задействовать одновременно массив фотометрических датчиков для регистрации интенсивности рассеянного света вместе с положением источников подобного света (следовательно, и гелей) в пространстве. Цифровая фотография косвенно содержит информацию о количестве гелей и их размере в пиксельном представлении. В каждом пикселе цифровой фотографии содержится количественная информация об интенсивности падающего на матрицу фотокамеры света.

Существует множество программ обработки цифровых изображений, связывающих интенсивность света с количеством пикселей, характеризующих определенный уровень интенсивности света (выбрана программа ImageJ). На цифровой фотографии выделяется область наблюдения, представляющая интерес. При изучении седиментации гелей такой областью может быть зона под мениском жидкости.

В этой области после перевода во взвешенное состояние происходит наибольшее изменение концентрации рассеивающих частиц (от максимальной до минимальной).

Количество гелевых частиц в области наблюдения можно связать со скоростью седиментации соотношением вида:

$$NL = N_0L - Ut, \quad (2)$$

где

$N$  и  $N_0$  – текущее и начальное количество частиц в поле наблюдения;

$t$  – время, с;

$L$  – высота слоя наблюдения, м;

$U$  – скорость седиментации, м/с.

Для расчета скорости оседания по формуле (2) необходимо выделить частицы на цифровой фотографии и подсчитать их число. Такой подсчет неудобен, так как требует разделения частиц на изображения. Более удобный способ заключается в том, что вместо подсчета числа частиц в поле наблюдения подсчитывается число пикселей с уровнем яркости, приписываемым гелевым частицам.

Каждый пиксель на цифровой фотографии рассматривается как фотометр, уровень яркости которого пропорционален интенсивности рассеянного света, регистрируемого цифровой камерой. Фотография гелей при боковом освещении содержит информацию не только о числе частиц, но и общем количестве геля.

Яркость (интенсивность рассеяния) гелевой частицы на фотографии определяется законами рассеяния света на малых оптических неоднородностях – порядка длины световой волны, а изображение частицы размером 1–10 мм формируется по законам геометрической

оптики. Поэтому можно связать интенсивность рассеяния света  $I$  поля наблюдения с рассеянием света малым объемом геля и числом частиц соотношением:

$$I = Ne, \quad (3)$$

где

$e$  – интенсивность рассеяния света малого объема геля, принятая одинаковой для частиц разного размера, в единицах градации интенсивности света.

Объемную долю геля  $V$  в поле наблюдения можно определить, используя интенсивность рассеяния света, по формуле:

$$V = N/N_0 = (I_t - I_{t0})/(I_{t0} - I_{t1}), \quad (4)$$

где

$I_t$  – средний текущий уровень яркости цифрового изображения или его фрагмента в единицах градации уровня яркости;

$I_{t0}$  и  $I_{t1}$  – минимальный и максимальный уровни яркости участков фотографии, создаваемые фоном и осадком гелей, соответственно.

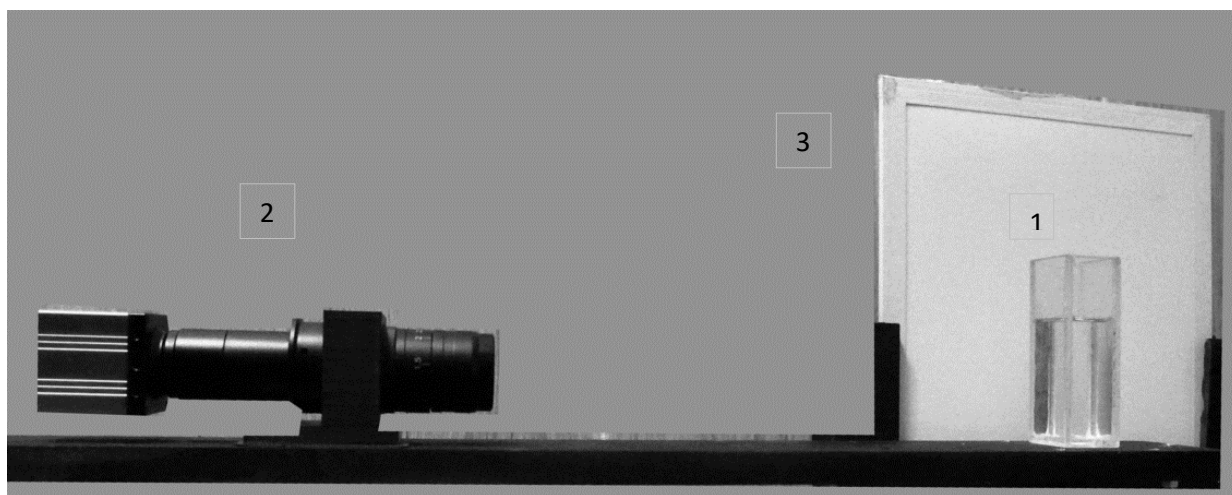
Формулы (3) и (4) совместно позволяют по результатам цифровой нефелометрии определять скорость седиментации гелевых частиц. В основе метода нефелометрии лежит измерение интенсивности рассеянного света на оптических неоднородностях гелевых частиц. Использование цифровой камеры в качестве датчика интенсивности рассеянного света позволяет дополнительно регистрировать размер и форму гелевых частиц, а также их распределение в пространстве.

При обработке полученных данных автором использовались различные варианты визуализации программы ImageJ.

Одним из вариантов является преобразование изображения в битовый формат, когда значение интенсивности рассеянного света принимает в пикселе цифровой фотографии всего два значения: 0 – для фона и 1 – для геля. В этом случае доля геля в поле наблюдения определяется как отношение числа пикселей со значением 1 к общему числу пикселей.

По другому варианту выделение гелевых частиц из фона производится по фотографии в 8-битном формате (в градациях серого цвета) с использованием гистограммы изображения, рассмотренной ниже.

Аппаратная реализация схемы видео-электронного наблюдения представлена на рис. 2.



1 – кювета с образцом, 2 – цифровая камера, 3 – боковой осветитель

**Рис. 2.** Внешний вид установки для оптико-электронного наблюдения седиментации дисперсных гелей методом цифровой нефелометрии

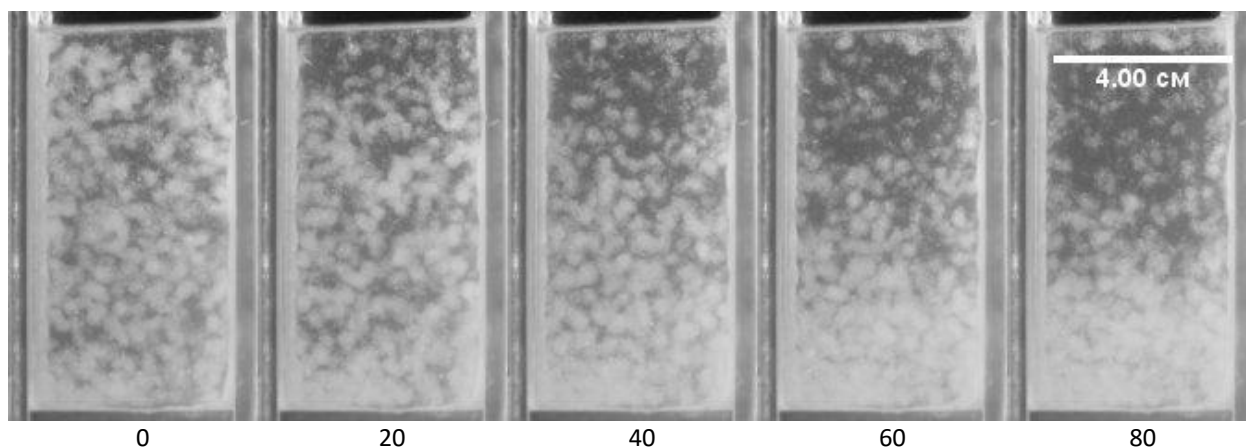
#### Методика проведения исследований

Объект исследований – полимерно-гелевая система – готовилась путем механического перемешивания в течение двух часов, смещением 0,5 г реагента «Темпоскрин-Плюс» со 100 г 5%-го водного раствора хлорида натрия. Готовую систему помещали в стеклянную кювету размером 30×40×120 мм.

Процесс измерения осуществлялся следующим образом. В фокус цифровой камеры помещали кювету, подсветку кюветы производили сбоку, а фон за кюветой создавался темным.

Перед началом регистрации производили интенсивное перемешивание смеси. Затем состояние образца записывалось цифровой камерой, регистрировался процесс оседания гелевых частиц под действием силы тяжести в дисперсионной среде.

Результаты представлены на рис. 3 в виде временной последовательности фотографий с интервалом 20 секунд. Там же дается репер для оценки реальных размеров гелевых частиц.

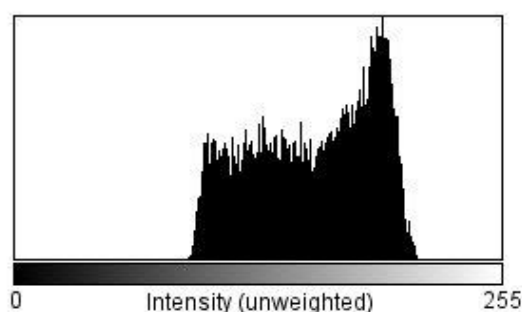


**Рис. 3.** Временная последовательность фотографий ПГС «Темпоскрин-Плюс» после смешения 0,5% реагента с 5% раствором NaCl и воды с интервалом 20 с, отражающая процесс седиментации частиц гелей

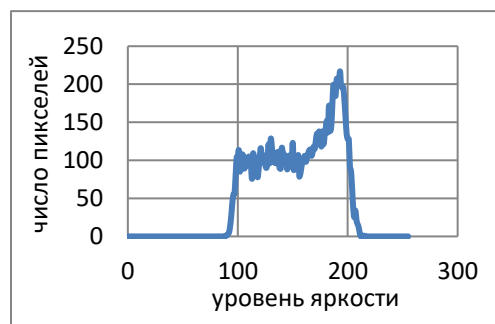
#### Анализ цифровых фотографий

При определении скорости осаждения гелевых частиц цифровой анализ фотографий осуществлялся по матрице размером  $221 \times 650$  пикселей. На каждом изображении под мениском жидкости был выделен прямоугольник размером  $71 \times 67$  пикселей. Масштабный коэффициент составил 0,396 мм/пиксель.

Уровни яркости отражались при помощи программного инструмента «Гистограмма» цифрового изображения. После обработки гистограмма интенсивности рассеяния света на фотографии изображалась в виде графика распределения элементов цифрового изображения с различной яркостью как функции от яркости числа пикселей с определенным значением яркости (рис. 4).



а



б

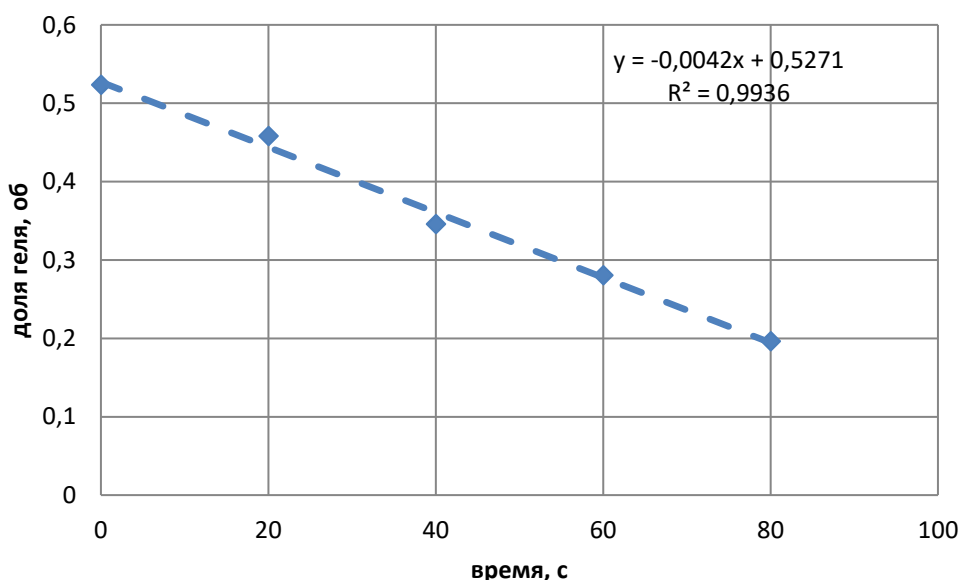
**Рис. 4.** Распределение элементов цифровой фотографии по уровню яркости: а – в графическом редакторе ImageJ, б – в программе Excel

Средний уровень интенсивности рассеяния гелевых частиц определялся по выделенному фрагменту фотографии ПГС в верхней половине кюветы после перемешивания с интервалом 20 секунд.

Максимальный и минимальный уровни освещенности определялись по двум выделенным фрагментам фотографии – в области осадка геля и в области без гелевых частиц.

На рис. 5 представлена кинетика седиментации гелевых частиц, рассчитанная с использованием уравнений (1) и (2). По зависимости концентрации частиц гелей во времени в поле наблюдения кюветы с полимерно-гелевой системой определена средняя скорость седиментации гелей на уровне 0,4 мм/с. Полученная скорость в 700 раз меньше приведенной выше оценки скорости потока ПГС в скважине при закачке ее в пласт. Соответственно, допустимо предположение о неучете оседания геля в процессе закачки. С другой стороны, если

процесс закачки остановлен, то в зоне перфорации будет происходить концентрирование гелевых частиц. Режим оседания можно оценить по критерию Рейнольдса. При среднем размере гелевых частиц 3 мм и вязкости водной среды 2 сСт значение числа Рейнольдса ( $Re$ ) составляет  $\approx 1$ . Последнее значение соответствует ламинарному режиму осаждения гелевых частиц. Малая скорость оседания частиц в скважине допускает возможность перерывов в процессе проведения технологических операций с ПГС.



**Рис. 5.** Зависимость доли геля в выделенной области верхней части кюветы от времени по данным видео-электронного наблюдения полимерно-гелевой системы в процессе седиментации гелей из 0,5%-го раствора реагента «Темпоскрин-Плюс» в 5%-ом растворе NaCl

## Часть 2. Моделирование технологии закачки в нефтяной пласт смеси воды и ПГС «Темпоскрин» на основе теории графов

Наиболее распространенным агентом на основе гидрофильных полимеров можно считать систему в виде водного раствора полиакриламида с добавлением

сшивающего агента – ацетата хрома [4]. Ранее считалось, что достоинством данной системы является первоначально низкая вязкость. Последняя обеспечивает возможность ее закачки в низкопроницаемый коллектор с созданием внутри пласта водоизолирующего гелевого экрана.



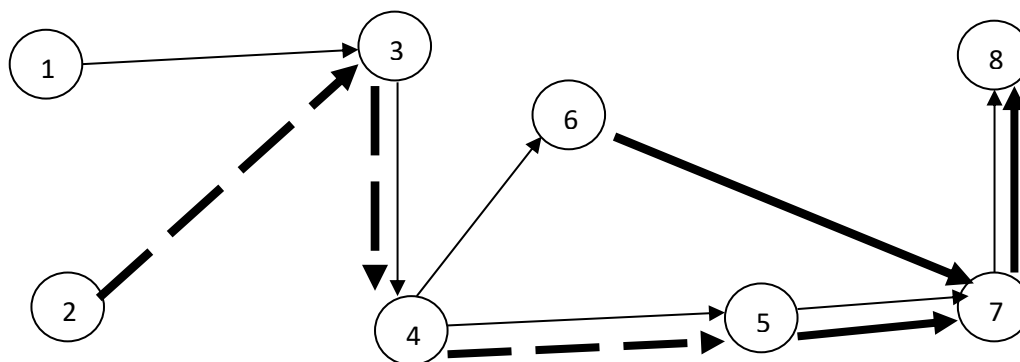
Кроме ацетата хрома часто указывают на возможность применения и других солей многовалентных металлов. Однако среди прочих сшивающих агентов ацетат хрома за счет регулирования времени гелеобразования обеспечивает возможность реализации этой технологии на промысле. Одним из негативных побочных процессов этой технологии является адсорбция полиакриламида на поверхности породы в период до гелеобразования, а также неселективная фильтрация технологического раствора в поровом объеме пласта.

Изучение подвижности дисперсных гелей системы «Темпоскрин» и ее модификации «Темпоскрин-Плюс» позволило сформулировать для них свою модель управления потоками флюидов в пласте, в которой предполагается создание подвижного гелевого экрана.

Эта модель может быть представлена на основе теории графов. Теория графов – раздел математики, обеспечивающий практическую возможность наиболее общей формализации любых объектов.

Перспективным представляется применение теории графов и при моделировании объектов нефтедобычи. Основные понятия и алгоритмы решения задач на основе теории графов изложены в [13, 14].

Преимуществом использования графов при моделировании процесса заводнения состоит в интуитивно понятной схеме процесса, которая в обобщенном виде представлена на рис. 6. Разработка пласта с заводнением включает закачку в пласт воды, а обработка пласта ПГС «Темпоскрин» приводит к потокоотклонению с извлечением дополнительной скважинной жидкости из добывающей скважины. Граф может быть представлен не только в виде планарного рисунка, но и виде абстрактного математического 3D объекта. Однако графическая визуализация процесса разработки пласта с заводнением более удобна, поскольку позволяет во многих случаях сопоставить геометрическое положение элементов графа (вершин или узлов) с реальным положением этого элемента в промысловом объекте.



Узлы графа: 1 – источник воды (цех ППД), 2 – источник ПГС «Темпоскрин», 3 – устье нагнетательной скважины, 4 – зона перфорации, 5 – промытая внутрипластовая область, 6 – нефтенасыщенная внутрипластовая область, 7 – зона перфорации добывающей скважины, 8 – устье добывающей скважины

Связи графа:   
 —————> – для потоков воды  
 —————> – для потоков геля  
 —————> – для потоков нефти

**Рис. 6.** Схема технологии «Темпоскрин» в виде графа с обозначениями узлов

Модель разработки нефтяного пласта включает в себя три подграфа – множество одних и тех же узлов (вершин), соединенных различными ориентированными связями (ребрами). Соответствующие связи ассоциируются с потоками соответственно воды, геля и нефти. Граф воды имеет исток и сток в нагнетательной и добывающей скважинах соответственно. Граф геля имеет исток в нагнетательной скважине, а сток – в объеме пласта. Исток графа нефти находится в пласте, а сток – в добывающей скважине. В силу трехфазной фильтрации воды, геля и нефти в едином поровом пространстве нефтяного коллектора закачка подвижного геля в пласт оказывает влияние на потоки воды и нефти.

Для графа технологии «Темпоскрин», представленной на рис. 6, дополнительно принята цифровая система обозначения узлов и их связей. Узлы графа, сопоставляемые двум областям нефтяного пласта, соответствуют двум условным областям пласта. Одна из них характеризуется высокой нефтенасыщенностью (узел «6»), а другая обладает низкой нефтенасыщенностью (узел «5»). Пространственное расположение указанных узлов не детализируется, что может оказаться полезным при принятии решения об обработке пласта этой системой с целью повышения добычи нефти.

Выбор промысловых объектов на месторождении производится под потребности нефтедобывающей компании. Параметры промыслового объекта – скважины в процессе эксплуатации меняются. Исходя из текущих промысловых данных, разработчик формулирует задание на проведение методов повышения нефтеотдачи. Выравнивание профиля приемистости – один из часто используемых вариантов. Физико-химические свойства

ПГС, в том числе их подвижность, учитываются совместно с геолого-промысловыми данными при разработке технологического плана работ и планируется их результат.

Граф движения геля, отмеченный на рис. 6 пунктиром, схематично указывает на путь движения ПГС в процессе обработки пласта. Часто такой процесс ограничен во времени 1–2 сутками. После завершения обработки пласта дисперсным гелем возможно его дальнейшее движение в пласте с влиянием на потоки воды и нефти. В соответствии с моделью, следует выделить два конкурирующих пути для воды – через узлы с низкой нефтенасыщенностью (узел «5») и высокой нефтенасыщенностью (узел «6»). Движение геля на этапе обработки пласта ПГС происходит по связям «4–5–7», что приводит к снижению фазовой проницаемости для воды в промытой области пласта, вызывая потокоотклонение с направлением закачиваемой воды в более высоко нефтенасыщенную область. Новый путь для воды реализуется по связям «4–6–7», в результате чего эта область пласта становится истоком для потоков нефти, поступающей в добывающую скважину, что и является причиной увеличения добычи нефти. Представленная граф-модель в наиболее общей форме описывает механизм воздействия ПГС «Темпоскрин» на потоки подземных флюидов и добычу нефти.

### Выводы

Разработан метод измерения подвижности гелей полимерно-гелевой системы «Темпоскрин» в процессе седиментации на основе цифровой нефелометрии. Показано, что в скважине и в пластовых условиях дисперсные гели сохраняют подвижность.

Модель технологии «Темпоскрин» может быть представлена в виде набора графов, которые характеризуют потоки воды, подвижной полимерно-гелевой системы и нефти наглядным образом, и демонстрирует увеличение добычи нефти при воздействии дисперсной полимерно-гелевой системой на нефтяной пласт.

Автор выражает признательность ООО НТФ «Атомбиотех» за предоставленные для исследования реагенты «Темпоскрин» и «Темпоскрин-Плюс», а также за ценные критические замечания при обсуждении статьи и анализе ее результатов.

*Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности (фундаментальные, поисковые и прикладные исследования)», № АААА-А19-119013190038-2).*

### Литература

1. *Каушанский Д.А., Демьяновский В.Б.* А.с. SU 1669404 А3. Добавка к закачиваемой в пласт воде «Темпоскрин» и способ получения добавки. № 4713456/03; Заявл. 03.04.1989; Опубл. 10.06.1999 // Изобретения. Полез. модели. 1999. Бюл. № 16. <http://www1.fips.ru>
2. *Каушанский Д.А., Демьяновский В.Б., Бакиров Н.Р. и др.* Результаты опытно-промысловых испытаний технологии «Темпоскрин-Плюс» для ограничения водопритоков на добывающих скважинах ООО «РН-Пурнефтегаз» // Нефтяное хозяйство. 2019. № 6. С. 78–82. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-6-78-82>
3. *Каушанский Д.А., Демьяновский В.Б., Сурмаев А.В. и др.* Результаты физико-химического воздействия на продуктивные пласты Вятской площади Арланского месторождения полимерно-гелевой технологией «Темпоскрин» // Нефтепромысловое дело. 2010. № 11. С. 19–24.
4. *Кетова Ю.А., Бай Б., Казанцев А.Л., Галкин С.В.* Анализ эффективности применения заводнения нефтеносных пластов на основе водорастворимого полиакриламида и предварительно сшитых полиакриламидных частиц // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2019. Т. 19, № 3. С. 251–262. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.3.5>
5. *Bai B., Li L., Liu Yu. et al.* Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and application // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2007. Vol. 10, No. 4. P. 415–422. <https://doi.org/10.2118/89389-PA>
6. *Желтов Ю.П.* Разработка нефтяных месторождений: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 332 с.
7. *Вихарев А.Н., Долгова А.И.* Гидравлика: режимы движения, уравнение Бернулли, потеря напора, каналы: Учебное пособие. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2001. 92 с.
8. Нефелометрия и турбидиметрия // Химическая энциклопедия. Т. 3 / Гл. ред. И.Л. Кнунянц. М.: Изд-во «Большая Российская энциклопедия», 1992. С. 439–441.
9. *Пиккеринг У.Ф.* Современная аналитическая химия / Пер. с англ. Б.Я. Спивакова и Г.И. Рамендика. М.: Химия, 1977. 560 с.
10. *Марков А.П.* Особенности световодной мутнометрии // Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. № 4(37). С. 93–103. [https://doi.org/10.53078/20778481\\_2012\\_4\\_93](https://doi.org/10.53078/20778481_2012_4_93)
11. *Михайлов А.П., Чибуничев А.Г.* Фотограмметрия: Учебник для вузов. М.: Изд-во МИИГАиК, 2016. 294 с.

12. *Rasband W.S.* ImageJ. Version 1.53k. U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, 2021. <https://imagej.nih.gov/>

13. *Алексеев В.Е., Захарова Д.В.* Теория графов: Учеб. пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. 119 с.

14. *Буркатовская Ю.Б.* Теория графов: Учеб. пособие. Часть 1. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 200 с.

## Investigation of the mobility of dispersed gels of the Temposcreen polymer-gel system

**V.B. Demyanovskiy**

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
E-mail: demian20@yandex.ru

**Abstract.** The article describes the method of optical-electronic observation of the process of sedimentation of gel particles in the polymer-gel system. The analysis of hydrodynamic movement of gel particles in laminar and turbulent modes during the implementation of the Temposcreen technology in oil production is carried out. The effect of hydrodynamic conditions on the mobility of the polymer-gel system in well and reservoir conditions, as well as on the distribution of the dispersal gel phase in the reservoir, is considered. On the basis of the graph theory, the model of fluid flow management in the oil layer by the Temposcreen mobile polymer-gel system is presented.

**Keywords:** oil production, dispersion gel, nephelometry, digital camera, digital photography, oil layer, graph theory.

**Citation:** *Demyanovskiy V.B.* Investigation of the mobility of dispersed gels of the Temposcreen polymer-gel system // Actual Problems of Oil and Gas. 2021. Iss. 3(34). P. 21–34. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-34.art2> (In Russ.).

### References

1. *Kaushansky D.A., Demyanovsky V.B.* A.c. SU 1669404 A3. Additive to the water injected into the formation Temposcreen and a method for obtaining an additive. No. 4713456/03; Appl. 03.04.1989; Publ. 10.06.1999 // Inventions. Useful models. 1999. Bull. No. 16. <http://www1.fips.ru> (In Russ.).
2. *Kaushanskiy D.A., Demyanovskiy V.B., Bakirov N.R.* et al. Field trial results of water shut-off in oil producing wells using the Temposcreen-Plus technology in RN-Purneftegas LLC // Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry. 2019. No 6. P. 78–82. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-6-78-82> (In Russ.).
3. *Kaushansky D.A., Demyanovsky V.B., Surmayev A.V.* Results of physical-chemical impact of polymer-gel “Temposkrin” technology on productive layers of Vyatka area of Arlansky oil field // Oilfield Engineering. 2011. No.11. P. 19–24. (In Russ.).
4. *Ketova Yu.A., Bai B., Kazantsev A.L., Galkin S.V.* Analysing the efficiency of flooding oil reservoirs with water-soluble polyacrylamide and preliminary cross-linked polyacrylamide particles // Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. 2019. Vol. 19, No. 3. P. 251–262. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.3.5> (In Russ.).
5. *Bai B., Li L., Liu Yu.* et al. Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and application // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2007. Vol. 10, No. 4. P. 415–422. <https://doi.org/10.2118/89389-PA>
6. *Zhel'tov Yu.P.* Oil field development: Textbook for universities. Moscow: Nedra, 1986. 332 p. (In Russ.).
7. *Vikharev A.N., Dolgov A.I.* Hydraulics: modes of motion, Bernoulli equation, pressure loss, channels: Textbook. Arkhangel'sk: Arkhangel'sk State Technical University, 2001. 92 p. (In Russ.).

8. Nephelometry and turbidimetry // Chemical encyclopedia. Vol. 3 / Ed. by I.L. Knunyants. Moscow: Great Russian Encyclopedia, 1992. P. 439–441. (In Russ.).
9. *Pickering W.F.* Modern analytical chemistry. New York: Marcel Dekker, 1971. 622 p.
10. *Markov A.P.* Features of light guide turbidity // Herald of the Belarusian-Russian University. 2012. No. 4(37). P. 93–103. [https://doi.org/10.53078/20778481\\_2012\\_4\\_93](https://doi.org/10.53078/20778481_2012_4_93) (In Russ.).
11. *Mikhailov A.P., Chibunichev A.G.* Photogrammetry: Textbook for universities. Moscow: Moscow State Institute of Geography and Mineralogy, 2016. 294 p. (In Russ.).
12. *Rasband W.S.* ImageJ. Version 1.53k. U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, 2021. <https://imagej.nih.gov/>
13. *Alekseev V.E., Zakharova D.V.* The graph theory: Textbook. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2017. 119 p. (In Russ.).
14. *Burkatovsky Yu.B.* The graph theory: Textbook. Part 1. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2014. 200 p. (In Russ.).