

# Исследование физико-химических и физико-механических свойств дисперсной полимерно-гелевой системы «Темпоскрин-Люкс» на основе агентов закачки, применяемых на месторождениях нефти Оренбургской, Самарской и Ульяновской областей

В.Б. Демьяновский\*, Д.А. Каушанский\*\*

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва  
E-mail: \*demian20@yandex.ru, \*\*dak@ipng.ru

**Аннотация.** 80–90% нефтяных месторождений в России разрабатывается с помощью технологии поддержания пластового давления, и в качестве агентов закачки используются воды с различной степенью минерализации от пресной (0.5 г/л) до высокоминерализованной (300 г/л), что влияет на качество и эффективность применяемых технологий. В статье приводятся данные по тестированию полимерно-гелевой системы на базе реагента «Темпоскрин-Люкс» применительно к высокоминерализованным водам, используемым для закачки в нефтяные пласты в Оренбургской, Самарской и Ульяновской областях (с минерализацией до 260 г/л). В статье отмечаются особенности изучения свойств дисперсной полимерно-гелевой системы «Темпоскрин-Люкс», рассматривается концепция, основанная на образовании упругих дисперсных гелей в условиях различной минерализации вод. Изучены кинетика и реологические свойства, влияние высокой минерализации и температуры. Полученные результаты позволили внедрить технологию «Темпоскрин-Люкс» на месторождениях Оренбургской, Ульяновской и Самарской областей с использованием в качестве агентов закачки высокоминерализованных вод.

**Ключевые слова:** дисперсная полимерно-гелевая система, реагент «Темпоскрин-Люкс», вода, нефтяной пласт, добыча нефти.

**Для цитирования:** Демьяновский В.Б., Каушанский Д.А. Исследование физико-химических и физико-механических свойств дисперсной полимерно-гелевой системы «Темпоскрин-Люкс» на основе агентов закачки, применяемых на месторождениях нефти Оренбургской, Самарской и Ульяновской областей // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art16>

## Введение

При длительной добыче нефти из нефтяных пластов с применением системы поддержания пластового давления закачкой воды в нагнетательные скважины происходит снижение дебитов нефти добывающих скважин вследствие снижения доли нефти в извлекаемой на поверхность жидкости. Особенно остро эта проблема стоит на старых месторождениях, к которым относятся месторождения Оренбургской, Самарской и Ульяновской областей. Основной причиной возникающих проблем является низкая эффективность вытеснения нефти применяемыми агентами закачки, при котором

закачиваемая через нагнетательные скважины в пласт вода движется через промытые зоны к добывающим скважинам. Для противодействия этому негативному процессу и увеличения охвата пласта водой используют модификацию агентов закачки полимерами.

Известны различные варианты технологий применения полимеров в нефтедобыче, но их можно сгруппировать по механизму воздействия на потоки воды в пласте: полимерное заводнение, вязко-упругие системы (ВУС) [1] и дисперсные полимерно-гелевые системы (ПГС) «Темпоскрин» [2–3].

При полимерном заводнении в пласт закачивается раствор полимера, который за счет повышенной вязкости раствора обеспечивает выравнивание фронта вытеснения нефти из пласта. Чтобы повысить вязкость полимерного раствора в него стали добавлять специальные добавки, которые сшивают молекулы полимера в растворе и еще более повышают его вязкость, а следовательно, и эффективность нефтедобычи. Такие сшитые в пластовых условиях полимерные системы получили название вязко-упругих систем. При использовании вязко-упругих систем первоначально обводненная зона нефтяного пласта замещается неподвижным и непроницаемым для воды гелем, а последующая закачка воды в пласт осуществляется в его нефтенасыщенные области. Третий механизм влияния на потоки воды в пласте с использованием полимеров состоит в применении дисперсных полимерно-гелевых систем типа «Темпоскрин». Реализация последнего механизма в технологии увеличения добычи нефти позволяет сочетать положительное качество полимерного заводнения – подвижность полимера в пласте и изоляцию гидропроводных зон нефтяного пласта. Преимуществом технологии «Темпоскрин» является высокая селективность ограничения потоков воды по отношению к размеру поровых каналов.

Начало использования технологии «Темпоскрин» положено разработкой в 1989 г. реагента «Темпоскрин» [2]. Промышленные испытания на различных месторождениях Западной Сибири, Казахстана и Поволжья показали ее эффективность при использовании агентов вытеснения с небольшим содержанием солей (до 20 г/л) и в пластах с температурой до 60 °С [3, 4]. Вместе с тем на многих объектах нефтедобычи в России в качестве агента нагнетания в пласт используются высокоминерализованные воды с содержанием солей в количестве 200 г/л и более, при этом температура пластов может быть выше 60 °С. К таким объектам относятся месторождения нефти Оренбургской, Самарской и Ульяновской областей. Для подобных условий нефтедобычи был разработан

усовершенствованный реагент «Темпоскрин-Люкс», отличающийся более высокой термической стабильностью в водных растворах с высокой минерализацией. В настоящей работе приводятся данные об исследовании физико-химических свойств дисперсных полимерно-гелевых систем «Темпоскрин-Люкс» на основе высокоминерализованных вод. Кроме того, рассмотрены некоторые аспекты взаимодействия дисперсных полимерных гелей с поровым объемом пласта на примере теоретической и лабораторной моделей движения гелевой частицы в неоднородном канале.

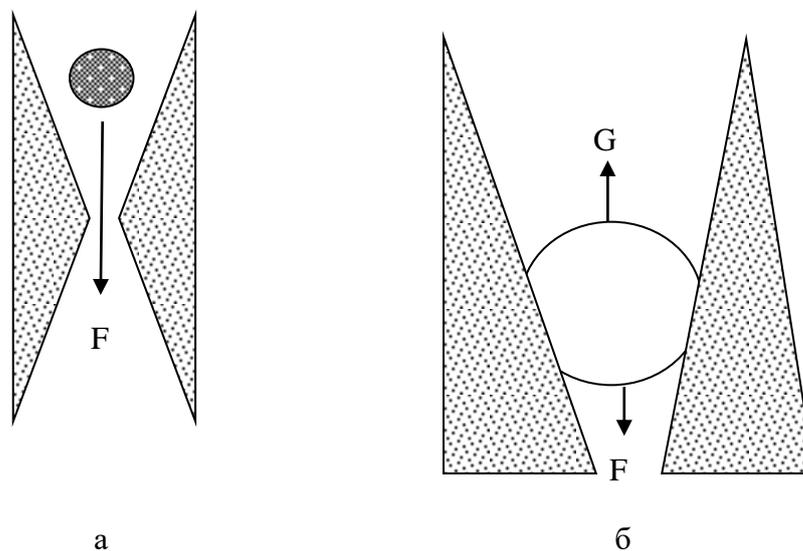
### **Особенности изучения свойств дисперсных полимерно-гелевых систем**

При изучении физико-химических свойств дисперсных гелевых систем приходится сталкиваться с необходимостью разработки специальных методик исследования, так как уже существующие стандартные методы оказываются малоинформативными. Примером может служить метод ротационной вискозиметрии, который является основой при исследовании свойств растворов полимеров. Применение этого метода к дисперсным полимерно-гелевым системам «Темпоскрин» позволяет получать некоторые значения вязкости и даже зависимость вязкости от скорости сдвига. Проблема состоит в том, что эти значения относятся к дисперсионной среде, а не к свойствам системы в целом.

Практика показала, что для изучения свойств гелей в дисперсной полимерно-гелевой системе необходимо определение несколько показателей: объема гелей в ПГС (доля геля), набухаемости реагента в воде (объем гелей в расчете на единицу массы реагента), скрин-фактора (условно показывает гидравлическое сопротивление при движении ПГС через сетку). Выбор этих показателей напрямую связан с принятой моделью влияния системы на потоки воды в пластовых условиях.

Концепция, основанная на образовании упругого дисперсного геля вне пласта, позволяет обосновать селективное действие этой системы в неоднородном пласте. Для этого полезно рассмотреть модель движения отдельной гелевой частицы в составе полимерно-гелевой системы в неоднородном канале под действием силы гидродинамического напора набегающей на частицу жидкости  $F$ , представленную на рис. 1. В свободном состоянии гелевая частица движется вдоль канала вместе с потоком воды. При размере канала, меньшем чем размер частицы, будет происходить упругая деформация, и при равенстве сил гидродинамического напора и силы упругой деформации  $G$  движение частицы прекратится, тем самым создав дополнительное гидродинамическое сопротивление потоку жидкости. Представленная модель указывает

на определяющую роль в управлении потоками воды в пластовых условиях размеров гелевых частиц и их упругих свойств, а не вязкости системы. Учитывая важность упругих свойств гелевых частиц, ранее в работе [4] был определен модуль упругости гелей «Темпоскрин», который составил величину порядка 1 кПа.



**Рис. 1.** Модель движения упругой гелевой частицы в неоднородном канале в свободном состоянии (а) и в состоянии упругой деформации (б), где  $F$  – сила гидродинамического напора,  $G$  – сила упругой деформации

Лабораторной реализацией модели движения упругой гелевой частицы в пласте можно считать методику определения скрин-фактора ПГС. Первоначально этот термин введен в разработках института «Гипровостокнефть» [1]. Для определения данного показателя были предложены две конструкции скрин-вискозиметров, основанные на измерении времени истечения растворов полимеров стандартного объема жидкой системы через пакет сеток с ячейками 0.15 мм. В первом варианте скрин-фактор определялся как отношение времени истечения раствора полимера к времени истечения того же объема воды под действием собственного веса. Во втором варианте, предназначенном для исследования свойств вязко-упругих сшитых систем, истечение раствора полимера происходило под действием давления газа величиной 20 кПа. В ООО НТФ «Атомбиотех» была разработана конструкция скрин-вискозиметра на основе второй конструкции «Гипровостокнефть», в которой для продвижения гелей через сетку с аналогичными параметрами используется избыточное давление газа. Основным отличием (наряду с повышением избыточного давления газа в два раза и снижением числа сеток до одной)

стало то, что, из-за невозможности измерить время истечения дисперсной гелевой системы через сетку, скрин-фактор рассчитывается как отношение объема пробы в ячейке вискозиметра к объему фильтрата, продавленному через сетку вискозиметра за определенное время (1 минуту). Такой подход при переходе от вязких растворов полимеров к ПГС сохранил общий смысл скрин-фактора как показателя гидродинамического сопротивления при движении через сетку – аналога пористой среды пласта.

Скрин-фактор ПГС зависит от размеров и упругих свойств гелевых частиц, минерализации воды, концентрации реагента, температуры. Модель движения упругой гелевой частицы в неоднородном канале, представленная выше, может рассматриваться одновременно и как элемент структуры порового пространства породы пласта, и как элемент из одной ячейки сетки скрин-вискозиметра. Поэтому данный показатель играет важную роль в контроле качества ПГС в производстве реагента «Темпоскрин-Люкс».

Для исследования свойств в минерализованных водах оказывается удобным является измерение объема гелей и гелевых частиц, которые при использовании специальных условий подсветки ячеек с образцами позволяют получить необходимую информацию о системе. Оптический метод наблюдения за поведением гелей в поровом пространстве позволяет иногда оценить их упругие свойства.

#### **Экспериментальная часть**

В работе использован реагент «Темпоскрин-Люкс», выпускаемый по ТУ 2216-004-05966919-2011 ООО НТФ «Атомбиотех». Реагент представляет собой порошкообразный полиакриламид, сшитый ионизирующим излучением в твердой фазе с добавкой термостабилизатора. Реагент соответствует техническим условиям при приготовлении полимерно-гелевой системы на основе пресной воды по следующим основным показателям, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

#### **Показатели выходного контроля при производстве реагента «Темпоскрин-Люкс»**

	Показатель для 0.5%-ой ПГС в пресной воде	Значение
1	Набухаемость, мл/г, не менее	200
2	Скрин-фактор, не менее	10
3	Доля гель-фракции в ПГС, % об., не менее	70
4	Вязкость, Па*с, не более	4

В этой таблице измеряемые показатели означают следующее:

- «Набухаемость» – отношение объема связанной в гель воды к массе полимера в составе геля;
- «Скрин-фактор ПГС» – характеризует сопротивление фильтрации ПГС через сетку 100 мкм под давлением 40 кПа, определяемое по методике ООО НТФ «Атомбиотех»;
- «Доля гель-фракции в ПГС» – отношение объема осадка геля ПГС к общему объему;
- «Вязкость» – определяется разными методами, например, ротационным вискозиметром, специализированными вискозиметрами ВЗ-246, ВБР-2 и т.п.

Наряду с указанными показателями ПГС, полезная информация о кинетике образования ПГС получена путем изучения размеров отдельных гелевых частиц методом оптической микроскопии.

В настоящем исследовании в качестве водной основы ПГС использованы агенты закачки, свойства которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

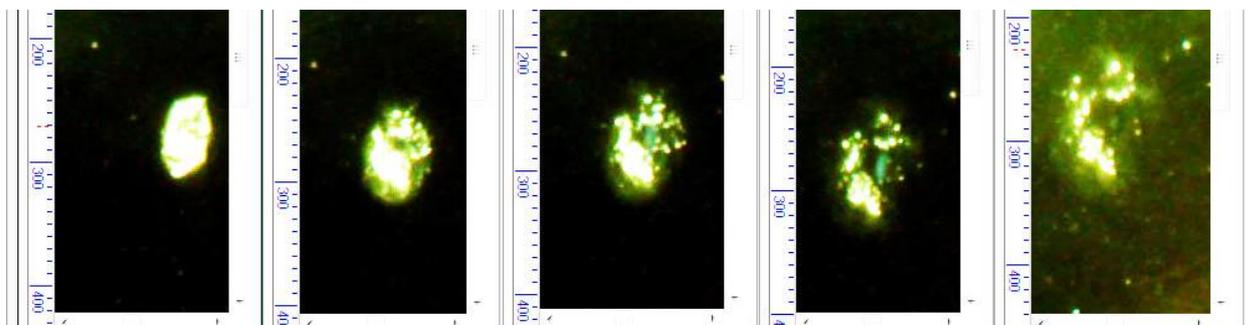
**Характеристика вод, используемых для приготовления полимерно-гелевых систем «Темпоскрин-Люкс»**

Месторождение	Удельный вес при 20 °С	рН	Минерализация	Концентрации ионов, г/дм <sup>3</sup>					
			г/дм <sup>3</sup>	HCO <sup>3-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> Na <sup>+</sup>
Оренбургская область									
Бобровское	1,14		192	0	115	1	7	2	67
Ульяновская область									
Западное	1.152		200*	0	123	0	14.4	0	63
Кудряшовское	1.152		200*	0	123	0	14.4	0	63
Самарская область									
Славкинское	1.165	6.09	261	0.279	159	1.532	10.3	2.1	88
Горбуновское	1.161	5.67	292	3.2	178	1.77	9.5	2.3	101
* модельная вода									

### Приготовление полимерно-гелевой системы и изучение кинетики набухания реагента в водной среде

Приготовление ПГС из сухого реагента и воды требует некоторого времени, необходимого для перехода реагента из сухого состояния в состояние дисперсного геля. Это время небольшое, но не менее 30 минут – в зависимости от типа воды. Процесс заключается в поддержании суспензии исходного полимера в воде во взвешенном состоянии за счет механического перемешивания. В процессе перемешивания происходит диффузия молекул воды в гранулы полимера, скорость которой определяет скорость образования геля (измерение этой скорости производили в статических условиях микроскопическим методом). В динамических условиях механического перемешивания скорость гелеобразования определяли по объему осадка геля после его седиментации в статических условиях.

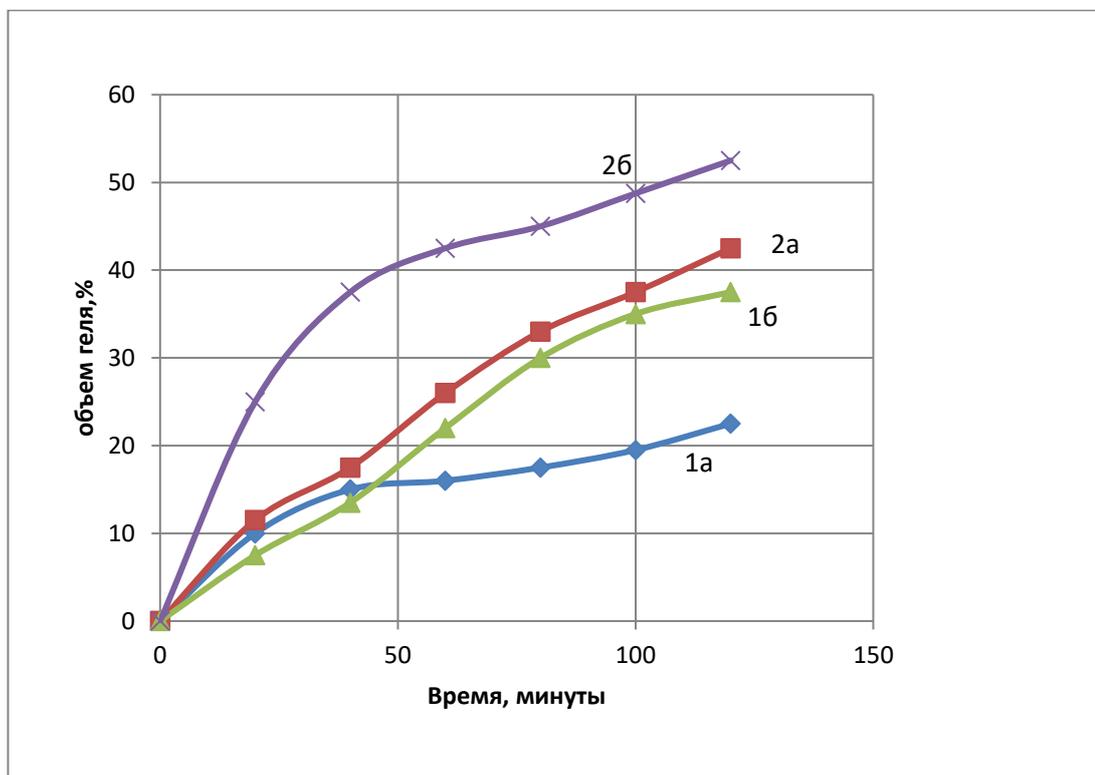
Микроскопические измерения осуществляли путем периодического фотографирования отдельной частицы реагента «Темпоскрин-Люкс» размером 0.5 мм (рис. 2), после помещения ее в водный раствор в чашке Петри. Результаты микроскопических исследований набухания частицы реагента «Темпоскрин-Люкс» в разные моменты времени свидетельствуют о быстром изменении объема частицы, помещенной в высокоминерализованную воду.



**Рис. 2.** Последовательность микрофотографий частицы реагента «Темпоскрин-Люкс» после контакта с модельной пластовой водой (минерализация 290 г/литр) в разные моменты времени (0 минут, 5 минут, 10 минут, 20 минут, 30 минут)

Измерения образования геля в динамических условиях проводили следующим образом. В лабораторный стакан объемом 200 мл помещали 100 мл испытуемого образца воды. Далее при механическом перемешивании вводили 1 г порошка реагента «Темпоскрин-Люкс». Это перемешивание периодически останавливали и измеряли

количество осадка геля в стакане. Результаты измерений образования геля «Темпоскрин-Люкс» в водах Западного и Кудряшовского месторождений Ульяновской области (минерализация 200 г/л), представленные на рис. 3, свидетельствуют об увеличении объема геля в системе примерно с 1% до половины объема системы за 2 часа.



**Рис. 3.** Кинетика образования геля реагента «Темпоскрин-Люкс» в водах Западного (а) и Кудряшовского (б) месторождений Ульяновской области (показано на двух образцах – 1 и 2, соответственно)

### **Вязкость дисперсной полимерно-гелевой системы**

Измерения вязкости ПГС были проведены на вискозиметре Брукфила марки DV-II+Pro с применением адаптера малых проб с использованием шпинделя №18 при различных скоростях сдвига. Температура измерений 20 °С. В качестве тестируемой системы подготовили ПГС с содержанием 0.75% и 1.1% реагента в воде (плотность воды 1.14 г/см) на Бобровском месторождении Оренбургской области.

Результаты, представленные в табл. 3, демонстрируют зависимость вязкости образцов полимерно-гелевой системы с ростом скорости сдвига, что можно объяснить наличием в ПГС растворимого в воде полимера. Однако в целом вязкость ПГС оказывается невысокой, несмотря на то, что гелевая фаза занимает до 90% объема.

Таблица 3

**Реологические свойства полимерно-гелевой системы на основе воды Бобровского месторождения Оренбургской области**

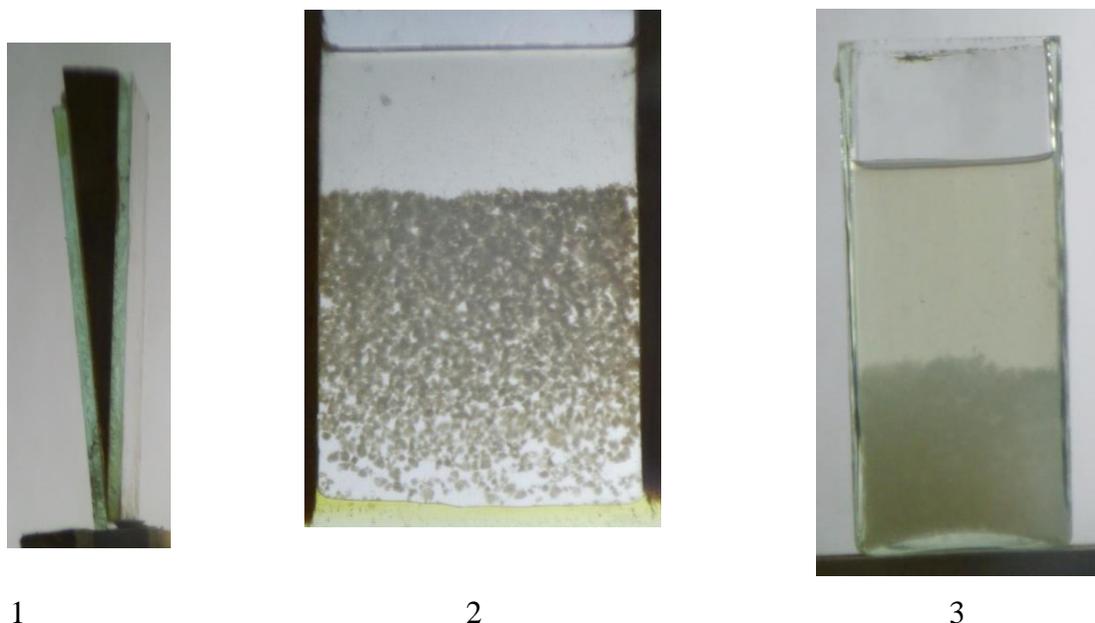
№ п/п	№ образца	концентрация реагента ПГС, %	объем геля, % об.	Вязкость, Па*с			
				Скорость сдвига 1/с			
				0.28	0.7	1.4	5.6
1	1	0.75	40	0.61	0.15	0.08	0.04
2	2	0.75	50	0.16	0.04	0.02	0.01
3	1	1.1	80	0.71	0.25	0.09	0.05
4	2	1.1	90	0.19	0.05	0.03	0.014

**Влияние температуры на упругие свойства гелей**

С целью оценки влияния температуры на упругие свойства гелевых частиц при комнатной температуре была приготовлена полимерно-гелевая система «Темпоскрин-Люкс» с концентрацией реагента 1% в воде с минерализацией 200 г/л и получена ПГС с содержанием гелей 55%. Далее систему помещали в герметичный контейнер и выдерживали его при температуре 85–90 °С в течении 72 часов. В результате была получена система с содержанием гелей 45%, что указывало на некоторое уменьшение общего объема гелевой фазы. Это могло быть связано с ростом плотности гелевых частиц при температурном воздействии, но их разрушения не наблюдалось.

Важным для оценки стабильности гелей к температуре является сохранение их упругих свойств. Для их оценки исследовали осаждение термически обработанных гелей в специально изготовленной клиновидной кювете. Кювета, состоящая из двух стеклянных пластинок размером 80\*150 мм, скрепленных по краям клиньями под углом 5.7 градуса, изображена на рис. 4. Для проведения измерений кювету устанавливали в вертикальное

положение и заливали в нее испытуемый образец ПГС. За счет большей плотности гелей по сравнению с водой гели оседали, но только до некоторого уровня, при котором уравниваются силы веса и упругой деформации гелей. В область, в которой расстояния между сторонами кюветы меньше размеров гелевых частиц, они, как видно из рис. 4, не проникают. Результаты измерений в клиновидной кювете можно соотнести с моделью движения гелевой частицы в неоднородном канале, представленной ранее на рис. 1. Отличие состоит в том, что вместо рассматриваемой на рис. 1 гидродинамической силы действует сила веса гелевой частицы. Для сравнения на рис. 4 приведена фотография осадка того же геля в прямоугольной кювете такого же объема. Сохранность упругих свойств гелей реагента «Темпоскрин-Люкс» показывает возможность их использования при температурах до 90 °С.



**Рис. 3.** Фотографии клиновидной кюветы сбоку (1), осадка геля ПГС после термической обработки при 90 °С в клиновидной (2) и прямоугольной (3) кюветах

### **Выводы**

1. Рассмотрены методы исследования свойств и механизм действия дисперсных полимерно-гелевых систем для целей увеличения добычи нефти на примере полимерно-гелевой системы «Темпоскрин-Люкс», приготовленных на основе высокоминерализованных вод месторождений Оренбургской, Ульяновской и Самарской области. Показано, что основными показателями, влияющими на потоки воды в неоднородных

каналах в пласте, следует считать объем гелевой фазы, размер гелевых частиц и их упругие свойства.

2. На основании результатов изучения кинетики набухания реагента, объема гелей, вязкости реагента «Темпоскрин-Люкс» в высокоминерализованных водах хлоркальциевого типа с концентрацией солей 200 г/л и выше сделан вывод о возможности использования агентов закачки указанных месторождений при концентрации реагента до 1.1% и в условиях пластовых температур до 90 °С.

*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) совместно с ООО НТФ «Атомбиотех».*

### **Литература**

1. РД 39-0148311-206-85. Руководство по проектированию и технико-экономическому анализу разработки нефтяных месторождений с применением метода полимерного воздействия на пласт. Миннефтепром СССР, 1985. 209 с.

2. *Каушанский Д.А., Демьяновский В.Б.* Пат SU 1669404 АЗ. Добавка к закачиваемой в пласт воде «Темпоскрин» и способ получения добавки. № 4713456/03; Заявл. 03.04.1989; Оpubл. 10.06.1999 // Изобретения. Полезные модели. 1999. Бюл. № 16. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>

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 системой «Темпоскрин» // Нефтепромысловое дело. 2010. № 11. С. 19–24.

4. *Барабанов В.Л., Демьяновский В.Б., Каушанский Д.А.* Изучение реологических неоднородностей жидких систем на примере набухших в воде дисперсных гелей полиакриламида // Актуальные проблемы нефти и газа. 2016. Вып. 1(13). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-13.art4>

## Study of physicochemical and physicomechanical properties of Temposcreen-Lux dispersed polymer-gel system on the basis of injection agents used in oil fields of Orenburg, Samara and Ulyanovsk regions

V.B. Demyanovsky\*, D.A. Kaushansky\*\*

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: \*demian20@yandex.ru, \*\*dak@ipng.ru

**Abstract.** 80–90% of oil fields in Russia are developed using maintenance of reservoir pressure, and waters with varying degrees of mineralization from fresh (0.5 g/l) to highly mineralized (300 g/l) are used as injection agents, which affects the quality and efficiency of applied technologies. The article presents data on testing the polymer-gel system based on the Temposcreen-Lux reagent as applied to highly mineralized waters used for injection into oil reservoirs in the Orenburg, Samara and Ulyanovsk regions (with salinity up to 260 g/l). The article notes the features of the study of the properties of the Temposcreen-Lux dispersed polymer-gel system, considers a concept based on the formation of elastic dispersed gels in conditions of different water salinity. The kinetics and rheological properties, the influence of high mineralization and temperature were studied. The results made it possible to introduce the Temposcreen-Lux technology in the fields of the Orenburg, Ulyanovsk and Samara regions using highly saline waters as injection agents.

**Keywords:** dispersed polymer-gel system, Temposcreen-Lux reagent, water, oil reservoir, oil production.

**Citation:** *Demyanovsky V.B., Kaushansky D.A.* Study of physicochemical and physicomechanical properties of Temposcreen-Lux dispersed polymer-gel system on the basis of injection agents used in oil fields of Orenburg, Samara and Ulyanovsk regions // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art16> (In Russ.).

### References

1. RD 39-0148311-206-85. Guidelines for the design and technical and economic analysis of the development of oil fields using the method of polymer impact on the formation. Ministry of Petroleum Industry of the USSR, 1985. 209 p. (In Russ.).
2. *Kaushansky D.A., Demyanovsky V.B.* Pat. SU 1669404 A3. Additive to the water injected into the formation Temposcreen and a method for obtaining an additive. No. 4713456/03; Statement 03.04.1989; Publ. 10.06.1999 // Inventions. Useful models. 1999. Bull. No. 16. – Available at: <http://www1.fips.ru> (In Russ.).
3. *Kaushansky D.A., Demyanovsky V.B., Surmaev A.V.* et al. Results of physical-chemical impact of polymer-gel Temposcreen technology on productive layers of Vyatka area of Arlansky oil field // Oilfield Engineering. 2010. No. 11. P. 19–24. (In Russ.).

4. *Barabanov V.L., Demyanovsky V.B., Kaushansky D.A.* The study of rheological heterogeneity of the liquid systems in the instance of the water-swollen dispersed gels of polyacrylamide // Actual Problems of Oil and Gas. 2016. Iss. 1(13). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-13.art4> (In Russ.).