

УДК 553.98
DOI 10. 56525/KWSI8763

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛАМКАС

М.Д. Бисенгалиев¹, Н.Ж. Бақтығалиева¹

¹Атырауский университет нефти и газа имени Сафи Утебаева, Атырау, Казахстан
e-mail: maks_bisengali@mail.ru; Nuraiym0120@mail.ru

Аннотация: В статье представлены результаты гидродинамических исследований нагнетательных скважин участков Ю-1 «Центр» и Ю-3 «ПЗ+СПС» месторождения Каламкас, выполненных в 2022–2024 гг. до и после внедрения технологий полимерного заводнения, а также полимерного заводнения в сочетании с системой поддержания пластового давления. Исследования выполнены методом кривых падения давления с последующей интерпретацией в программном обеспечении «Сапфир» с использованием радиальных, радиально-компонитных и трещинных моделей пласта, что позволило оценить фильтрационные характеристики и состояние призабойной зоны. Установлено, что до внедрения полимерных технологий основным режимом фильтрации являлся радиальный режим течения. После закачки полимерных растворов в ряде скважин зафиксированы линейный и билинейный режимы, связанные с развитием трещиноватости и перераспределением фильтрационных потоков. По результатам интерпретации отмечено увеличение эффективной проницаемости, гидропроводности и коэффициента приемистости, а также снижение скин-фактора. Полученные данные подтверждают эффективность применения полимерных технологий и целесообразность их дальнейшего внедрения на месторождении Каламкас. Результаты могут быть использованы при обосновании режимов закачки, прогнозировании работы нагнетательных скважин и повышении нефтеотдачи залежей в аналогичных геолого-промысловых условиях разрабатываемых месторождений поздней стадии эксплуатации нефти и газа региона.

Ключевые слова: гидродинамические исследования скважин; кривая падения давления; полимерное заводнение; проницаемость пласта; скин-фактор; приемистость скважин; радиально-компонитная модель; месторождение Каламкас.

Введение. Разработка месторождения Каламкас осуществляется в соответствии с применением площадного заводнения девятиточечной схемой расположения скважин путем закачки рабочего агента для поддержания пластового давления с плотностью сетки 16 га/скв. Закачка была введена с 1979 г. Поскольку основным методом искусственного воздействия на нефтяные пласты остается заводнение, повышение его эффективности является главной задачей.

Одной из причин недостаточной эффективности заводнения является высокое соотношение вязкостей добываемой нефти в пластовых условиях и закачиваемой воды, при этом неоднородность пористой среды усугубляет неравномерность продвижения фронта вытеснения. Повышению эффективности системы заводнения может способствовать применение методов физико-химического воздействия на продуктивные пласты.

Отечественный и зарубежный опыт разработки нефтяных месторождений показывает, что одним из наиболее широко распространенных методов повышения нефтеотдачи, эффективность применения которого убедительно подтверждена результатами опытно-промышленных испытаний, является полимерное заводнение с использованием водорастворимых полимеров. Механизм полимерного заводнения основан на снижении подвижности закачиваемой воды за счёт повышенной вязкости полимерного раствора, создания фактора сопротивления в высокопроницаемой части пласта, выравнивании фронта

продвижения закачиваемой воды по площади заводнения и вертикальному разрезу продуктивного пласта.

На месторождении Каламкас опытно-промышленные работы (ОПР) по внедрению технологии полимерного заводнения были начаты 80-х годах XX века. На сегодняшний день накоплен значительный опыт, технологическая эффективность подтверждается литературными источниками [1, 2, 3, 4, 5].

На месторождении Каламкас вскрытый бурением разрез осадочных пород представлен отложениями триасового, юрского, мелового и четвертичного возрастов.

Юрские отложения залегают на размытой поверхности триасовых отложений с угловым и стратиграфическим несогласием и представлены нижним, средним и верхним отделами.

Нижнеюрские породы имеют ограниченное распространение и фиксируются в эрозионных впадинах триаса, на месторождении Каламкас выделяются условно в скважине №82 интервалы 1155-1162 м, 1162-1170 м. Литологические отложения представлены алевролитами мелкозернистыми с включениями углефицированных растительных остатков.

Отложения средней юры в литологическом отношении представлены неравномерным чередованием глин и песчано-алевролитовых пород, причем песчано-алевролитовые породы наблюдаются в верхней части разреза. Характерной особенностью среднеюрских отложений является обильное присутствие растительной органики. Для пород этого отдела характерны серые, светло-серые и зеленовато-серые оттенки. К среднему отделу юрских отложений приурочены Ю-4С - Ю-VII продуктивные горизонты. Средний отдел включает в себя аленский, байосский и батский ярусы.

Отложения верхней юры имеют ограниченное распространение и присутствуют в наиболее погруженных северо-западной и западной частях структуры и относятся к кимеридж-титонскому ярусу. К этим отложениям приурочен продуктивный горизонт Ю-5С, залегающий с размывом на подстилающих породах горизонта Ю-4С. По литологической характеристике эти отложения делятся на две части: нижнюю – терригенную и верхнюю – карбонатную. Верхнеюрские отложения представлены алевролитами, глинами, известняками и доломитами.

В тектоническом отношении Каламкаская антиклинальная складка приурочена к северной части Северо-Бузачинского свода, расположенного на северо-западном окончании Туранской плиты [6].

Материалы и методы. Объектом исследования являлись нагнетательные скважины участков Ю-1 Центр и Ю-3 ПЗ+СПС месторождения Каламкас, в которых в период 2022-2024 гг. проводились гидродинамические исследования скважин (ГДИС) до и после внедрения технологий полимерного заводнения (ПЗ) и полимерного заводнения в сочетании с СПС (ПЗ+СПС).

Гидродинамические исследования выполнялись сервисной компанией «Алстрон» методом кривых падения давления (КПД) в нагнетательных скважинах с применением измерительных комплексов АЦМ и PPS. Исследования проводились с целью определения фильтрационно-ёмкостных характеристик пласта, оценки состояния призабойной зоны скважин (ПЗП), а также анализа изменения гидродинамических параметров пласта в процессе разработки месторождения и внедрения методов увеличения нефтеотдачи.

В ходе ГДИС регистрировались изменения забойного давления во времени при остановке и последующем восстановлении режима работы скважин. Полученные данные характеризуют усреднённые фильтрационные параметры пласта в пределах зоны дренирования скважины, межскважинного пространства либо локальной области призабойной зоны.

Интерпретация результатов ГДИС выполнялась с использованием специализированного программного обеспечения «Сапфир». В процессе интерпретации применялись аналитические модели притока жидкости к забою скважины с учетом геолого-технологических особенностей месторождения. Для анализа использовались следующие модели:

- радиальная модель гомогенного пласта;

- радиально-композитная модель пласта;
- модель вертикальной скважины;
- модель скважины с вертикальной трещиной конечной проводимости.

Выбор модели осуществлялся на основе диагностики режимов течения по логарифмическим и полулогарифмическим графикам изменения забойного давления и его производной.

В результате интерпретации определялись основные гидродинамические и фильтрационные параметры, включая:

- проницаемость пласта;
- пьезопроводность;
- гидропроводность;
- коэффициент приемистости скважин;
- скин-фактор;
- интерполированное пластовое давление;
- параметры трещин (длина крыла, проводимость) для скважин с ГРП.

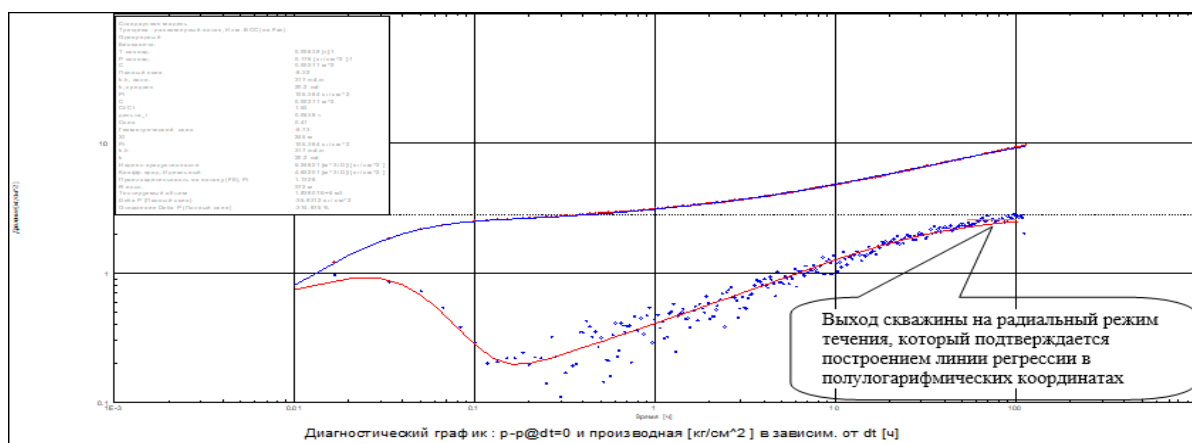
Режимы течения флюидов и фильтрационно-ёмкостные свойства пласта определялись методом построения графиков КПД в логарифмических координатах и анализа их производных, что позволяло диагностировать радиальный, линейный и билинейный режимы течения.

Для оценки эффективности внедрения полимерного заводнения и ПЗ+СПС проведено сравнение результатов ГДИС до и после применения технологий по каждой исследуемой скважине. Анализ изменений фильтрационных параметров выполнялся с учетом изменения режима течения, состояния призабойной зоны и степени вовлечения недренлируемых участков пласта в процесс фильтрации.

Для интерпретации исследования выбрана вертикальная модель скважины с радиальной композитной моделью пласта. По результатам интерпретации кривой падения давления диагностируется выход скважины на радиальный режим течения, указывающий на работу скважины с закачкой полимерного раствора. Также точность определения значения проницаемости подтверждается построением линии регрессии на полулогарифмическом графике.

Скин-фактор имеет отрицательное значение, что говорит о хорошем состоянии призабойной зоны скважины.

Режим течения в районе скважины радиальный, радиально композитный пласт. Радиальная композитная модель состоит из внутренней цилиндрической гомогенной (однородной) области, окруженной областью с отличными свойствами. Поток в обеих областях модели радиальный и горизонтальный. (Рисунок 1,2; Таблица 1) [7].



2023г.

Рисунок 1 – Изменение забойного давления во времени (КПД) в логарифмических координатах и ее производная по скважине №1059 до ПЗ

По результатам моделирования ГДИС установлено, что в большинстве случаев фильтрационные процессы адекватно описываются радиальной гомогенной и радиально-компонитной моделями пласта, при этом радиально-компонитная модель чаще фиксируется после внедрения полимерного заводнения, что свидетельствует о формировании зон с различными фильтрационными свойствами в пределах радиуса дренирования скважин.

Изменение фильтрационных параметров при внедрении полимерного заводнения (участок Ю-1 Центр)

Сравнительный анализ результатов ГДИС по скважинам участка Ю-1 Центр показал существенное увеличение фильтрационных характеристик пласта после внедрения полимерного заводнения.

Так, по скважинам №1059, №3067Д и №3070Д отмечается многократный рост значений проницаемости — с 10–30 мД до 1300–2540 мД, сопровождающийся увеличением пьезопроводности и гидропроводности. Аналогичная тенденция наблюдается и по коэффициенту приемистости, значения которого после ПЗ увеличились в 1,3–5,2 раза.

По скважине №3073 после внедрения ПЗ диагностировано формирование вертикальной трещины с длиной крыла 258 м, что обусловило переход режима течения к билинейному и линейному. При этом проницаемость пласта увеличилась с 309 до 1990 мД, а скин-фактор изменился с $-0,8$ до $-6,6$, что указывает на значительное улучшение фильтрационных условий в призабойной зоне.

Для большинства исследованных скважин характерны отрицательные значения скин-фактора как до, так и после внедрения ПЗ, что свидетельствует о хорошем состоянии призабойной зоны скважин и наличии развитой системы трещин. После полимерного заводнения в ряде скважин наблюдается дополнительное снижение скин-фактора, указывающее на повышение гидродинамической эффективности закачки.

По скважине №556 исследования после ПЗ не проводились, однако результаты ГДИС до внедрения технологии показали радиальный режим течения и отрицательное значение скин-фактора, что характеризует удовлетворительное состояние призабойной зоны.

Результаты ГДИС при внедрении ПЗ+СПС (участок Ю-3 ПЗ+СПС) [8].

Анализ данных ГДИС по скважинам участка Ю-3 ПЗ+СПС также подтвердил положительное влияние применения полимерных технологий на фильтрационные свойства пласта.

По скважине №570 сохранён билинейный и радиальный режимы течения до и после ПЗ+СПС, при этом выявлена вертикальная трещина с длиной крыла 76 м. После внедрения технологии отмечается рост проницаемости с 31,28 до 39,64 мД и снижение скин-фактора до $-5,7$, что свидетельствует о стабилизации фильтрационных условий в зоне воздействия.

По скважинам №571, №3083Д и №3082 после применения ПЗ+СПС зафиксировано увеличение проницаемости в 1,3–3,5 раза, сопровождающееся ростом коэффициента приемистости и пьезопроводности. В ряде случаев наблюдается переход от трещинной модели скважины к модели вертикальной скважины с радиальным режимом течения, что указывает на перераспределение потоков и вовлечение ранее недренируемых зон пласта в процесс фильтрации.

Изменение интерполированного пластового давления до и после внедрения ПЗ+СПС носит умеренный характер, что свидетельствует о стабильности пластовой системы и отсутствии признаков ухудшения гидродинамического состояния пласта при применении полимерных технологий.

Обобщение результатов

В целом результаты гидродинамических исследований показали, что внедрение технологий ПЗ и ПЗ+СПС на месторождении Каламкас приводит к:

увеличению проницаемости и гидропроводности пласта;

росту коэффициента приемистости нагнетательных скважин;

улучшению состояния призабойной зоны, подтверждённому отрицательными значениями скин-фактора;

вовлечению в фильтрацию ранее недренируемых участков пласта за счёт перераспределения потоков в трещиноватой среде.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения полимерных технологий для интенсификации фильтрационных процессов и повышения охвата заводнением в условиях месторождения Каламкас.

Обсуждение. Полученные результаты гидродинамических исследований нагнетательных скважин участков Ю-1 Центр и Ю-3 ПЗ+СПС месторождения Каламкас свидетельствуют о выраженном влиянии внедрения технологий полимерного заводнения и полимерного заводнения в сочетании со СПС на характер фильтрационных процессов и гидродинамические параметры пласта.

Доминирование радиального режима течения, зафиксированного по большинству исследованных скважин, указывает на формирование устойчивого дренируемого объёма пласта и корректность выбранных моделей интерпретации. В то же время выявление линейного и билинейного режимов течения после внедрения ПЗ и ПЗ+СПС в ряде скважин связано с наличием вертикальных трещин, сформированных в результате ранее проведённых гидроразрывов пласта, а также с перераспределением потоков при закачке полимерных растворов.

Существенный рост значений проницаемости и гидропроводности после внедрения полимерного заводнения, зафиксированный по скважинам участка Ю-1 Центр, не следует рассматривать как прямое изменение поровой структуры коллектора. Данный эффект обусловлен, прежде всего, гидродинамическим перераспределением потоков, при котором полимерный раствор, обладая повышенной вязкостью, снижает подвижность воды в высокопроницаемых каналах и способствует вовлечению в фильтрацию ранее недренируемых зон пласта. Это приводит к увеличению эффективной проницаемости, определяемой по данным ГДИС [9].

Формирование радиально-компазитной модели пласта после внедрения ПЗ является отражением неоднородности фильтрационных свойств в пределах зоны дренирования скважины. Внутренняя область с повышенными фильтрационными характеристиками, как правило, связана с развитием трещиноватости и улучшением условий фильтрации в призабойной зоне, тогда как внешняя область характеризуется исходными свойствами пласта. Подобная структура пласта подтверждает эффективность полимерного заводнения в перераспределении фронта закачки и повышении охвата заводнением.

Отрицательные значения скин-фактора, зафиксированные по большинству скважин как до, так и после внедрения ПЗ и ПЗ+СПС, свидетельствуют о хорошем состоянии призабойной зоны и наличии развитой системы трещин. При этом дополнительное снижение скин-фактора после применения полимерных технологий указывает на стабилизацию фильтрационных условий в зоне забоя и снижение гидравлического сопротивления при закачке. В отдельных скважинах наблюдаемое уменьшение абсолютного значения отрицательного скин-фактора может быть связано с частичным экранированием трещин полимерным раствором и выравниванием профиля приемистости.

Результаты ГДИС на участке Ю-3 ПЗ+СПС демонстрируют более умеренные изменения фильтрационных параметров по сравнению с участком Ю-1 Центр. Это объясняется, с одной стороны, более равномерным распределением закачки, а с другой — дополнительным влиянием СПС, способствующей стабилизации фильтрационного режима без резкого увеличения проницаемости. Рост коэффициента приемистости и пьезопроводности в сочетании с сохранением радиального режима течения указывает на повышение гидродинамической эффективности системы без признаков деградации пластовых свойств.

Отсутствие значительных изменений интерполированного пластового давления после внедрения ПЗ и ПЗ+СПС свидетельствует о том, что применение полимерных технологий не приводит к неблагоприятным гидродинамическим последствиям, таким как локальная перегрузка пласта или ухудшение условий фильтрации. Напротив, стабильность давления

подтверждает адаптацию пластовой системы к новым условиям фильтрации и устойчивость режима разработки.

В целом, результаты обсуждения подтверждают, что гидродинамические исследования являются эффективным инструментом оценки влияния полимерных технологий на процессы фильтрации в условиях трещиновато-поровых коллекторов месторождения Каламкас. Полученные данные обосновывают целесообразность дальнейшего применения и масштабирования технологий ПЗ и ПЗ+СПС с обязательным сопровождением регулярными ГДИС для контроля изменений фильтрационных параметров и оптимизации режимов закачки.

Выводы. 1. По результатам гидродинамических исследований нагнетательных скважин участков Ю-1 Центр и Ю-3 ПЗ+СПС месторождения Каламкас установлено, что основным режимом течения флюидов является радиальный режим, что свидетельствует об устойчивой гидродинамической связи скважин с дренируемым объемом пласта.

2. Интерпретация ГДИС показала, что фильтрационные процессы на месторождении адекватно описываются радиальной гомогенной и радиально-композиционной моделями пласта, при этом радиально-композиционная модель чаще диагностируется после внедрения полимерного заводнения, отражая формирование зон с различными фильтрационными свойствами.

3. Внедрение технологий полимерного заводнения и ПЗ+СПС приводит к увеличению эффективной проницаемости, пьезопроводности и гидропроводности пласта, а также к росту коэффициента приемистости нагнетательных скважин, что указывает на повышение гидродинамической эффективности закачки.

4. Отрицательные значения скин-фактора, зафиксированные по большинству исследованных скважин, свидетельствуют о хорошем состоянии призабойной зоны и наличии развитой трещиноватости, сформированной в результате ранее проведенных гидроразрывов пласта; применение полимерных технологий способствует стабилизации фильтрационных условий в зоне забоя.

5. Анализ режимов течения после внедрения ПЗ и ПЗ+СПС показал вовлечение ранее недренируемых участков пласта в процесс фильтрации за счёт перераспределения потоков в трещиновато-поровой среде, что повышает охват заводнением.

6. Изменения интерполированного пластового давления до и после применения полимерных технологий носят умеренный характер, что свидетельствует об отсутствии негативного влияния на гидродинамическое состояние пласта и устойчивости системы разработки.

7. Результаты выполненных гидродинамических исследований подтверждают эффективность применения технологий ПЗ и ПЗ+СПС в условиях месторождения Каламкас и обосновывают целесообразность их дальнейшего применения при обязательном гидродинамическом сопровождении [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. «Научно-производственный центр», 2011.
2. Швецов И.А., Куйбышев В.В. Разработка и внедрение технологии применения водорастворимых полимеров в осложненных геолого-физических условиях месторождения Каламкас. Отчет «Гиревостокнефть», 1985.
3. Малышев Н.А. Разработка и внедрении технологии применения водорастворимых полимеров в осложненных геолого-физических условиях месторождения Каламкас. 1988.
4. Технологическая схема испытания метода полимерно-щелочного заводнения на опытной площадке Ю-IV продуктивного горизонта месторождения Каламкас (сверхплановый отчет) – ВНИИ, Гипрвостокнефть, КазНИПИнефть, 1987.
5. Куйбышев В.В., рук. к.т.н. Б. Ф. Сазонов. Совершенствование метода полимерного заводнения с целью расширения области его рентабельного применения и повышения эффективности, отчет Гипрвостокнефть, 1985.
6. Якупова Э., Шиланов Н., Сисенбаева М., Орынбасар Е., Мушарова Д. и др. Отчет

по лабораторным исследованиям по выбору оптимального полимера для условий месторождения Каламкас, АО «Мангистаумунайгаз», 2018.

7. Seright, R.S., Campbell, A.R., Mozley, P.S., Han Peihui. 2010. Stability of Partially Hydrolyzed Polyacrylamides at Elevated Temperatures in the Absence of Divalent Cations. SPE J. 15 (2): 341-348. SPE-121460-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/121460-PA>.

8. Джалимбаева Н., Шалабаев М., Шиланов Н. и др. Результаты исследования образцов месторождения Каламкас сканирующим электронным микроскопом. г.Актау. 2017.

9. Seright, R.S. and Skjevrak, I. 2015. Effect of Dissolved Iron and Oxygen on Stability of HPAM Polymers. SPE J. 20 (3): 433-441. SPE-169030-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/169030-PA>.

10. Jouenne, S., Klimenko, A., Levitt, D. Polymer Flooding: Establishing Specifications for Dissolved Oxygen and Iron in Injection Water. 2017. 22 (2). SPE-179614-PA. <https://doi.org/10.2118/179614-PA>.

КАЛАМҚАС КЕН ОРНЫН ИГЕРУ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ ҰҢҒЫМАЛАРДЫҢ ГИДРОДИНАМИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕРІ

М.Д. Бисенгалиев¹, Н.Ж. Бақтығалиева¹

¹Сафи Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті, Атырау, Қазақстан
e-mail: maks_bisengali@mail.ru; Nuraiym0120@mail.ru

Андатпа. Мақалада Каламкас кен орнының Ю-1 Орталық және Ю-3 ПЗ+СПС учаскелеріндегі нагнетательный ұңғымалардың гидродинамикалық зерттеулері 2022–2024 жылдары полимерлі су басу технологиялары мен ПЗ+СПС енгізілгенге дейін және кейін жүргізілген нәтижелері ұсынылған. Зерттеулер қысымның төмендеу қисықтары әдісімен жүргізіліп, «Сапфир» бағдарламалық қамтамасыздандыруында радиалды, радиалды-композиттік және жарықтық модельдерді қолдану арқылы интерпретацияланған. Негізгі ағыс режимі радиалды болып анықталса, полимерлі технологиялар енгізілгеннен кейін кейбір ұңғымаларда сызықты және билинейнді режимдер тіркелген, бұл жарықтық дамуына байланысты. Эффективті өткізгіштік, гидропроводтылық және қабылдағыш коэффициенттің өскені, сондай-ақ ұңғыманың қабылдау аймағының жағдайының жақсарғаны полимерлі технологияларды Каламкас кен орнында қолданудың тиімділігін растайды.

Түйін сөздер: Ұңғымалардың гидродинамикалық зерттеулері; қысымның төмендеу қисығы; полимерлі су басу; пласт өткізгіштігі; скин-фактор; ұңғымалардың қабылдау қабілеті; радиалды-композиттік модель; Каламкас кен орны.

HYDRODYNAMIC STUDIES OF WELLS AS A TOOL FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF DEVELOPMENT OF THE KALAMKAS FIELD

M.D. Bisengaliev¹, N.Zh. Baktygalieva¹

¹ Atyrau University of Oil and Gas named after Safi Utebayev, Atyrau, Kazakhstan
e-mail: maks_bisengali@mail.ru; Nuraiym0120@mail.ru

Abstract: The article presents the results of hydrodynamic studies of injection wells in the Ю-1 Center and Ю-3 PZ+SPS sections of the Kalamkas field, carried out in 2022–2024, both before and after the implementation of polymer flooding and polymer flooding combined with SPS technologies. The studies were conducted using the pressure decline curve method, followed by interpretation in the “Sapphire” software using radial, radial-composite, and fracture reservoir models. It was established that the main flow regime is radial, while after the implementation of polymer technologies, linear and bilinear flow regimes were observed in some wells, associated with the development of fracturing. An increase in effective permeability, hydraulic conductivity, and

injectivity coefficient, as well as an improvement in the condition of the near-wellbore zone, was demonstrated, confirming the effectiveness of applying polymer technologies at the Kalamkas field.

Keywords: Hydrodynamic well studies; pressure decline curve; polymer flooding; reservoir permeability; skin factor; well injectivity; radial-composite model; Kalamkas field.