

УДК 622.276.43

**Д.П. Ушахин, С.Н. Кривошеков, В.А. Репина**

**D.P. Ushahin, S.N. Krivoshchekov, V.A. Repina**

Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет, Пермь, Россия

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЗАВОДНЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ОБЪЕКТА ВЗВ4 ШУМОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

### **GEOLOGICAL ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF CYCLIC FLOODING OF THE production facility ВЗВ4 OF THE SHUMOVSKY FIELD**

Приведена оценка эффективности циклического заводнения, применяемого в настоящее время на эксплуатационном объекте ВЗВ4 Шумовского месторождения. В ходе анализа геологических и технологических характеристик объекта, а также нагнетательного и добывающего фондов выявлены слабоэффективные участки заводнения. В программном продукте Tempest MORE (Roxar) на актуальной гидродинамической модели выполнено перераспределение закачиваемого агента и по этому расчету получены положительные результаты. По варианту с перераспределением на одной из скважин добывающего фонда смоделировано одно геолого-техническое мероприятие – радиальное бурение. Получены хорошие приросты дебитов.

**Ключевые слова:** Шумовское месторождение, Кардопольское поднятие, объект ВЗВ4, циклическое заводнение, радиальное бурение, гидродинамическое моделирование

The paper evaluates the effectiveness of cyclic flooding currently used at the operational facility ВЗВ4 of the Shumovsky field. During the analysis of the geological and technological characteristics of the object, as well as injection and extraction funds, weakly effective areas of flooding were identified. In the Tempest MORE (Roxar) software product, a redistribution of the injected agent was performed on the current hydrodynamic model, and positive results were obtained according to this calculation. According to the variant with redistribution, one geological and technical event was modeled on one of the wells of the producing fund – radial drilling. Good increases in production rates were obtained.

**Keyword:** Shumovskoe field, Kargopolskoe high, object ВЗВ4, cyclic flooding, radial drilling, hydrodynamic modeling.

Актуальность данной работы определяется тем, что на эксплуатационном объекте ВЗВ4 Шумовского месторождения остро стоит проблема низкого пластового давления, а также низких дебитов скважин и низких темпов отбора для III стадии разработки. На данном объекте реализовано циклическое заводнение как самый эффективный метод увеличения нефтеотдачи [1, 2]. Такое неста-

ционарное воздействие приводит к возникновению циклических разнонаправленных градиентов давления между высоко- и низкопроницаемыми прослоями, что способствует подключению зон с низкими фильтрационно-емкостными свойствами в активную разработку [3]. Выполнен анализ геологических и технологических показателей с целью установления возможных причин снижения пластового давления, разработаны рекомендации для оптимизации процесса эксплуатации.

Рассмотрено распределение коэффициента проницаемости по площади залежи как основной фильтрационной характеристики, влияющей на величину и скорость дренирования запасов. Проницаемость – способность горных пород пропускать через себя жидкость или газы при наличии перепада давления [4, 5]. Карта распределения построена по данным керна и геофизических исследований скважин. Коэффициент проницаемости изменяется в пределах от 20,6 до 1007 мД, среднее значение 115 мД. Повышенные значения коэффициента проницаемости отмечаются в северо-западной и юго-восточной частях поднятия.

Далее рассмотрены основные технологические характеристики и проанализирована закономерность их изменения в зависимости от распределения коэффициента проницаемости. Текущие дебиты нефти по состоянию на 01.01.2022 изменяются в пределах от 0,2 до 8,3 т/сут, в среднем 3 т/сут. Увеличение дебитов нефти происходит в направлении с северо-востока на северо-запад и юго-восток, что совпадает с распределением значений коэффициента проницаемости. Текущие дебиты жидкости по состоянию на 01.01.2022 изменяются в пределах от 2,5 до 17,2 т/сут, в среднем 9,3 т/сут. Повышенные значения дебитов жидкости расположены в центральной части поднятия. Обводненность изменяется в пределах от 34,5 до 97,5 %, в среднем 68 %. Рост обводненности происходит в направлении с северо-востока на северо-запад и юго-восток. Закачка рабочего агента изменяется в пределах от 15 до 43 м<sup>3</sup>/сут, в среднем 25 м<sup>3</sup>/сут. Повышение закачки происходит в направлении с северо-востока на юго-запад. Накопленная добыча нефти по скважинам изменяется в пределах от 1,075 до 63,441 тыс. т, в среднем 29,223 тыс. т. Повышенные значения накопленной добычи нефти расположены в северо-западной и юго-восточной частях поднятия, что совпадает с распределением коэффициента проницаемости. Накопленная добыча жидкости по скважинам изменяется в пределах от 2,461 до 103,231 тыс. м<sup>3</sup>, в среднем 48,072 тыс. м<sup>3</sup>. Повышенные значения накопленной добычи жидкости расположены в северо-западной и юго-восточной частях поднятия, что также совпадает с распределением коэффициента проницаемости. Пластовое давление в процессе разработки по состоянию на 01.01.2022 изменяется в пределах от 3,31 до 8,68 МПа, в среднем

6 МПа. Наибольшие значения давления наблюдаются в юго-восточной части, наименьшие значения на периферии.

Далее, на основании данных фонда скважин объекта ВЗВ4 на 01.04.2022 по приемистости и дебитам жидкости и актуальной гидродинамической модели [6–8], с целью детального анализа влияния объемов закачки на процесс нефтеизвлечения и дальнейших рекомендаций по оптимизации системы поддержания пластового давления выполнены анализ зон по охвату закачкой и расчет двух прогнозных вариантов эксплуатации объекта с циклическим заводнением соответственно.

По Кардопольскому поднятию в ходе анализа по компенсации отборов жидкости закачкой выделены участки с перекомпенсацией и недокомпенсацией (рис. 1):

- район нагнетательных скважин № 728 и 778 – 105 % (50 м<sup>3</sup>/сут закачиваемого агента на 47,6 м<sup>3</sup>/сут дебита жидкости) компенсации отборов жидкости (добывающие скважины № 729, 730, 732, 735, 738);
- район нагнетательных скважин № 733 и 745 – 79 % (55 м<sup>3</sup>/сут закачиваемого агента на 69,6 м<sup>3</sup>/сут дебита жидкости) компенсации отборов жидкости (добывающие скважины № 657, 739, 740, 746, 9057);
- район нагнетательных скважин № 741\_ и 766 – 70 % (50 м<sup>3</sup>/сут закачиваемого агента на 71,4 м<sup>3</sup>/сут дебита жидкости) компенсации отборов жидкости (добывающие скважины № 746, 747, 752, 753, 761, 765);
- район нагнетательных скважин № 737, 743, 749 – 160 % (60 м<sup>3</sup>/сут закачиваемого агента на 37,5 м<sup>3</sup>/сут дебита жидкости) компенсации отборов жидкости (добывающие скважины № 742, 748, 764, 774).

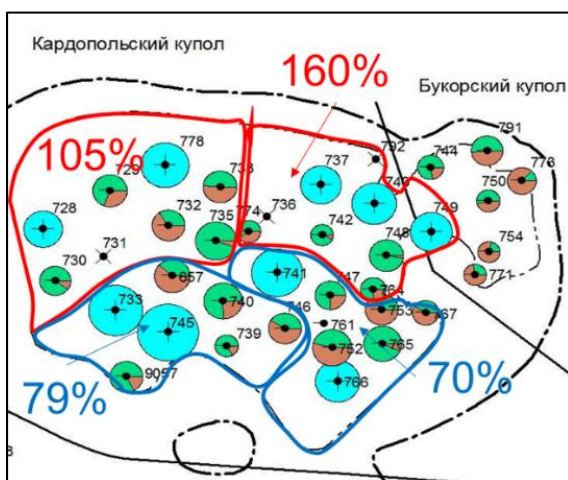


Рис. 1. Карта текущих отборов объектов ВЗВ4

Таким образом, можно выделить юго-восточную зону поднятия, где наряду с самыми низкими давлениями в зоне отбора (3,0–3,7 МПа) также наблюдается недокомпенсация (70 %) закачкой – на эту часть в большей степени влияют две нагнетательные скважины № 741 и 766, которые в свою очередь работают с постоянным режимом закачки. Можно предположить, что этот участок месторождения нуждается в перераспределении закачки для равномерного охвата залежи заводнением, а также улучшения энергетического состояния. Для эффективного перераспределения закачки проанализированы доли влияния нагнетательных скважин на добывающие и выделены наиболее значимые для увеличения закачиваемого рабочего агента скважины.

В данной работе на основании актуальной гидродинамической модели разработаны и рассчитаны два прогнозных варианта эксплуатации объекта с циклическим заводнением с прогнозным периодом на 10 лет (с апреля 2022 г. по апрель 2032 г.).

Базовый вариант – существующая система разработки – предполагает циклическое заводнение с 01.04.2022 по 30.09.2022 с двумя рядами нагнетательных скважин с полупериодом 8 суток (в первую очередь работают нагнетательные скважины верхнего ряда – № 737, 743, 749, 778; во вторую очередь скважины нижнего ряда – № 728, 733, 745), в то же время с постоянной закачкой работают две скважины – № 741, 766. С 01.10.2022 по 31.03.2022 все нагнетательные скважины работают с постоянной закачкой. Суммарный объем закачки по поднятию принят по плану с апреля 2021 г. и составляет  $215 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Оптимизированный вариант разработан в рамках данной работы, реализован на гидродинамической модели и предполагает циклическое заводнение с 01.04.2022 по 30.09.2022 с двумя рядами нагнетательных скважин с полупериодом 8 суток (в первую очередь работают нагнетательные скважины верхнего ряда – № 737, 743, 749, 778; во вторую очередь скважины нижнего ряда – № 728, 733, 745), в то же время с постоянной закачкой работают две скважины – № 741, 766. С 01.10 по 31.03 все нагнетательные скважины работают с постоянной закачкой. Суммарный объем закачки по поднятию увеличен на  $25 \text{ м}^3/\text{сут}$  и составляет  $240 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

В табл. 1 представлены объемы закачки по базовому и оптимизированному вариантам, где цветом выделены изменения закачки: красным – отрицательные изменения (уменьшение закачки), желтым – без изменения закачки, зеленым – положительные изменения (увеличение закачки).

В первую очередь объемы закачки в оптимизированном варианте увеличены в скважинах № 733 ( $+15 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) и 741 ( $+10 \text{ м}^3/\text{сут}$ ); во вторую очередь объемы закачки увеличены в скважинах № 737 ( $+15 \text{ м}^3/\text{сут}$ ), 741 ( $+10 \text{ м}^3/\text{сут}$ ); при постоянном заводнении объемы закачки были уменьшены в скважине № 728 ( $-10 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) и увеличены в скважинах № 737 ( $+5 \text{ м}^3/\text{сут}$ ), 741 ( $+15 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) и 745 ( $+15 \text{ м}^3/\text{сут}$ ).

Таблица 1

## Различия в объемах закачки по вариантам разработки

Вариант разработки	Приемистость скважин без изменения закачки по плану (базовый вариант), м <sup>3</sup> /сут										Приемистость скважин с изменением закачки (оптимизированный вариант, +25 м <sup>3</sup> /сут)									
	Номер скважины										Номер скважины									
	728	733	737	741	743	745	749	766	778	788	728	733	737	741	743	745	749	766	778	788
1-я очередь	39	46	0	45	0	40	45	0	45	0	39	61	0	55	0	40	45	0	45	0
	39	46	0	45	0	40	45	0	45	0	39	61	0	55	0	40	45	0	45	0
	39	46	0	45	0	40	45	0	45	0	39	61	0	55	0	40	45	0	45	0
	39	46	0	45	0	40	45	0	45	0	39	61	0	55	0	40	45	0	45	0
	39	46	0	45	0	40	45	0	45	0	39	61	0	55	0	40	45	0	45	0
	39	46	0	45	0	40	45	0	45	0	39	61	0	55	0	40	45	0	45	0
	39	46	0	45	0	40	45	0	45	0	39	61	0	55	0	40	45	0	45	0
	39	46	0	45	0	40	45	0	45	0	39	61	0	55	0	40	45	0	45	0
2-я очередь	0	0	25	45	30	0	35	45	35	0	0	0	40	55	30	0	35	45	35	0
	0	0	25	45	30	0	35	45	35	0	0	0	40	55	30	0	35	45	35	0
	0	0	25	45	30	0	35	45	35	0	0	0	40	55	30	0	35	45	35	0
	0	0	25	45	30	0	35	45	35	0	0	0	40	55	30	0	35	45	35	0
	0	0	25	45	30	0	35	45	35	0	0	0	40	55	30	0	35	45	35	0
	0	0	25	45	30	0	35	45	35	0	0	0	40	55	30	0	35	45	35	0
	0	0	25	45	30	0	35	45	35	0	0	0	40	55	30	0	35	45	35	0
	0	0	25	45	30	0	35	45	35	0	0	0	40	55	30	0	35	45	35	0

Окончание табл. 1

Вариант разработки	Приемистость скважин без изменения закачки по плану (базовый вариант), м <sup>3</sup> /сут										Приемистость скважин с изменением закачки (оптимизированный вариант, +25 м <sup>3</sup> /сут)									
	Номер скважины										Номер скважины									
	728	733	737	741	743	745	749	766	778	728	733	737	741	743	745	749	766	778		
Постоянная закачка	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		
	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		
	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		
	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		
	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		
	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		
	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		
	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		
	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		
	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		
	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		
	25	30	25	30	20	25	15	20	25	15	30	30	45	20	40	15	20	25		

По оптимизированному варианту на 01.04.2032 (рис. 2) расчетная накопленная добыча нефти составляет 904,5 тыс. м<sup>3</sup> (прирост составил 6,5 тыс. м<sup>3</sup>).

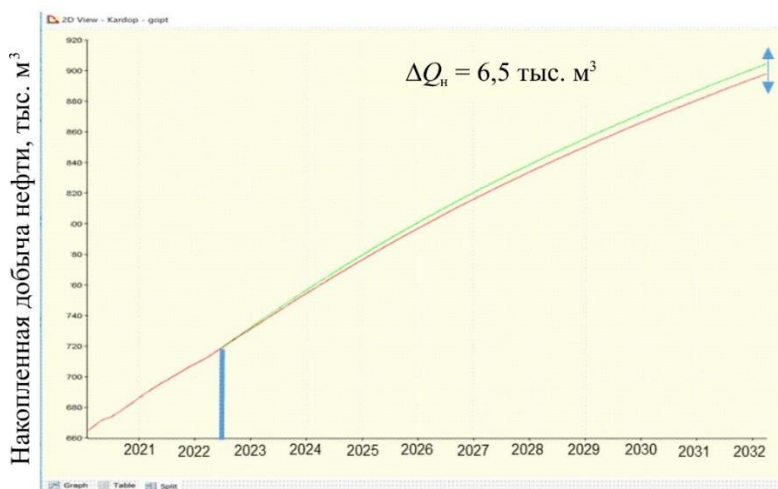


Рис. 2. График накопленной добычи нефти по Кардопольскому поднятию

Оптимизированный вариант составлялся с главной целью – улучшение энергетического состояния Кардопольского поднятия.

Для детального поскважинного анализа составлена таблица изменения давления в зависимости от варианта разработки по каждой скважине (синим цветом выделены нагнетательные скважины) (табл. 2).

Таблица 2

Изменение пластового давления по двум вариантам разработки

Номер скважины	$P_{пл}$ базовый вариант, МПа	$P_{пл}$ оптимизированный вариант, МПа	$\Delta P_{пл}$ , МПа
657	5,0	5,0	0
728	7,3	6,9	-0,4
729	5,2	5,1	-0,1
730	5,9	5,9	0
732	3,7	3,7	0
733	7,6	7,7	0,1
735	4,5	4,6	0,1
737	6,8	7,3	0,5
738	4,6	4,7	0,1
739	5,4	5,6	0,2
740	4,2	4,3	0,1
741	5,4	5,9	0,5

Окончание табл. 2

Номер скважины	$P_{пл}$ базовый вариант, МПа	$P_{пл}$ оптимизированный вариант, МПа	$\Delta P_{пл}$ , МПа
742	5,4	5,5	0,1
743	7,2	7,4	0,2
745	8,2	9,1	0,9
746	4,3	4,5	0,2
747	3,8	4,0	0,2
748	5,1	5,1	0
749	6,6	6,7	0,1
752	3,2	3,4	0,2
753	3,4	3,4	0
761	3,5	3,5	0
764	3,6	3,6	0
765	3,4	3,4	0
766	6,3	6,4	0,1
767	4,0	4,0	0
774	4,6	4,8	0,2
778	6,1	6,2	0,1
9057	6,2	6,2	0

Таким образом, с помощью предложенного перераспределения закачки из зон с перекомпенсацией (скважины северо-восточной части залежи № 728, 778) в зоны недокомпенсации (скважины юго-восточной части № 741, 766) и увеличения объемов закачиваемого агента на 11 % удалось улучшить энергетическое состояние Кардопольского купола на основании расчетов на трехмерной модели, а также получить дополнительно 6,5 тыс. м<sup>3</sup> нефти с незначительным увеличением обводненности (1,1 %) за 10-летний период эксплуатации.

### Список литературы

1. Васильев В.В., Тонков Л.Е. Оценка применимости циклического заводнения на поздней стадии разработки нефтяных месторождений // Нефтяное хозяйство. – 2004. – № 12. – С. 36–38.
2. Медведский Р.И., Ишин А.В. Увеличение нефтеотдачи путем длительного ограничения закачки воды в пласт до уровня добычи нефти // Нефть и газ. – 2000. – № 6. – С. 24–29.
3. Анализ результатов применения технологии нестационарного воздействия на Родниковом месторождении / Н.П. Захарова [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2008. – №12. – С. 58–62.



4. Галкин В.И., Кочнева О.Е. Геология и геохимия нефти и газа: учеб.-метод. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 173 с.

5. Николаев А.В. Зависимость потребления электроэнергии главной вентиляторной установки от способа проветривания добычных участков калийных рудников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2011. – Т. 10, № 1. – С. 143–151.

6. Пятибратов П.В. Гидродинамическое моделирование разработки нефтяных месторождений: учеб. пособие для вузов / Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина. – М., 2015. – 167 с.

7. Кривошеков С.Н., Кочнев А.А., Равелев К.А. Разработка алгоритма определения технологических параметров нагнетания кислотного состава при обработке призабойной зоны пласта с учетом экономической эффективности // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250, № 4. – С. 587–595.

8. Уточнение геолого-гидродинамической модели сложнопостроенной залежи нефти путем комплексного анализа данных / Н.Д. Козырев, А.А. Кочнев, А.Г. Менгалиев, И.С. Путилов, С.Н. Кривошеков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 10. – С. 164–177.

### Сведения об авторах

**Ушахин Дмитрий Павлович** – студент, горно-нефтяной факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: dmitry.ushahin@yandex.ru.

**Кривошеков Сергей Николаевич** – доцент кафедры «Геология нефти и газа», горно-нефтяной факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: krivoshchekov@gmail.com.

**Репина Вера Андреевна** – доцент кафедры «Геология нефти и газа», горно-нефтяной факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: silajcheva.v@yandex.ru.

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (номер гранта НШ-1010.2022.1.5).

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Получена:** 25.09.2022

**Одобрена:** 14.10.2022

**Принята к публикации:** 01.12.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Ушахин, Д.П. Геологический анализ эффективности циклического заводнения эксплуатационного объекта ВЗВ4 шумовского месторождения / Д.П. Ушахин, С.Н. Кривошеков, В.А. Репина // Журнал магистров. – 2022. – № 2. – С. 47–56.

Please cite this article in English as: Ushahin D.P., Krivoshchekov S.N., Repina V.A. Geological analysis of the effectiveness of cyclic flooding of the production facility b3b4 of the shumovsky field. Master's journal, 2022, no. 2, pp. 47-56.