

## ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ КАК ВАРИАНТ ОПТИМИЗАЦИИ КОЛЛЕКТОРА ДВОЙНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

УДК 622.276.435

CHANGING THE MODE OF PRODUCTION WELLS HOW OPTIONS TO OPTIMIZE COLLECTOR DUAL PERMEABILITY

**Владимиров И. В., Варисова Р. Р.,  
Альмухаметова Э. М.**  
Уфимский государственный  
нефтяной технический  
университет, г. Уфа,  
Уфимский государственный  
нефтяной технический университет,  
филиал, г. Стерлитамак,  
филиал, г. Октябрьский,  
Российская Федерация

**I. V. Vladimirov, R. R. Varisova,  
E. M. Almukhametova**  
Ufa State Petroleum Technological  
University, Ufa,  
Ufa State Petroleum  
Technological University,  
Branch, the Sterlitamak, Branch, the  
Oktyabrskiy,  
the Russian Federation

С истощением запасов легкой нефти доля текущих запасов вязкой и высоковязкой нефти будет возрастать, поэтому поиск эффективных методов разработки залежей высоковязкой нефти является закономерным направлением развития нефтедобывающей промышленности. В настоящее время в разработке залежей высоковязкой нефти широко применяют тепловые методы воздействия. Несмотря на достаточно хорошую эффективность данного метода, технологии теплового воздействия характеризуются высокой энергоемкостью, отсроченностью эффекта, что в ряде случаев может существенно снизить экономическую привлекательность метода. Особенно остро данный вопрос стоит в условиях снижения мировых цен на нефть. Применение малозатратных технологий, какой является нестационарное заводнение (НЗ), в разработке залежей высоковязкой нефти (ВВН) имеет малое число примеров. Однако имеющаяся информация о результатах применения НЗ на таких залежах позволяет считать технологию достаточно эффективной. Динамика технологического эффекта от применения НЗ указывает на снижение эффективности применяемой технологии со временем, что требует постоянной ее модификации. Нестационарное заводнение, как метод повышения нефтеотдачи пластов, достаточно хорошо изучено, успешно внедрено на ряде месторождений России и ближнего зарубежья. В становление и развитие технологии значительный вклад сделали многие известные ученые. Однако, применительно к разработке залежей высоковязкой нефти, нестационарное воздействие изучено в недостаточной мере. Имеются лишь отдельные упоминания о применении НЗ в разработке залежей ВВН. Среди последних работ по данной теме можно назвать работы Владимирова И. В., Пичугина О. Н., Горшкова А. В. Альмухаметовой Э. М.

With the depletion of easy oil, the proportion of current reserves viscous and heavy oil will increase, so the search of effective methods of development of deposits of heavy oil is a natural direction of development of the oil industry. Currently, the development of deposits of heavy oil are widely used heat methods. Despite the relatively good efficiency of this method, technologies of thermal effects are characterized by high energy intensity, the time lag effect, which in some cases can significantly reduce the economic attractiveness of the method. Especially sharply this question costs in the face of declining world oil prices. The use of low-cost technologies, which is non-stationary water-flooding (NC), in the development of high-viscous oil deposits (BBH) has a small number of examples. However, available information on the effects of the NT on such deposits, allows you to think of technology quite effective. Dynamics of technological effect of the use of NZ indicates a decrease in the efficiency of the technology over time, which requires constant modifications. Non-stationary water-flooding as a method of increasing oil recovery has been well studied, successfully implemented a number of fields in Russia and abroad. In the formation and development of technology significant contribution made by many famous scientists. However, in relation to the development of deposits of heavy oil, the unsteady effect is studied insufficiently. There are only some references to the NT in the development of deposits BBH. Among recent works on the topic of the project Vladimirov I. V., Pichugin O. N., Gorshkov A. V., Almukhametova E. M.

**Ключевые слова:** коллектор, заводнение, нестационарное заводнение, высоковязкая нефть, циклическая закачка, интенсификация, проницаемость.

**Key words:** collector, flooding, unsteady water flooding, heavy oil, cyclic injection, intensification, permeability.

Нестационарные (гидродинамические) методы заводнения в силу простоты своей технологической организации активно используются при разработке нефтяных месторождений. Существует опыт их эффективного применения на месторождениях нефтей повышенной вязкости (до 100 мПа·с), среди которых наиболее крупное в РФ — Ромашкинское месторождение [1, 2]. Гидродинамические методы заводнения включают не только управление движением агента вытеснения с помощью согласованного во времени и по площади разработки изменения режима работы нагнетательных и добывающих скважин, темпов нагнетания и отбора, внутрислоевого воздействия

по ограничению водопритоков, обработки призабойной зоны пласта и т.п., но и оптимизацию в целом системы поддержания пластового давления. Гидродинамическое воздействие на разработку месторождения осуществляется и без спланированных технологических намерений в силу введения в эксплуатацию новых скважин, проведения геолого-технологических материалов или наступления иных обстоятельств, связанных с изменением режима работы скважин.

В отличие от стационарного заводнения, циклическая закачка воды создает условия для интенсивного обмена флюидами между гидродинамически связанными слоями коллектора разной проницаемости. Тем самым увеличивается текущий коэффициент охвата пласта заводнением [3, 4]. Нестационарное заводнение или упруго-капиллярный циклический метод заводнения основан на создании периодического воздействия на неоднородные пласты, при котором в продуктивных пластах создается нестационарное

распределение пластового давления и возникает неустановившееся движение жидкостей и газа [3].

Согласно данным разных исследователей эффективность нестационарного заводнения неоднородных по проницаемости пластов определяется двумя процессами: внедрением воды в малопроницаемые зоны пласта при циклическом воздействии и капиллярным удержанием ее в малопроницаемых зонах пласта [4].

Технологии нестационарного заводнения привлекательны своей низкой стоимостью, отсутствием капитальных вложений и незначительным изменением эксплуатационных затрат. Нестационарное поле пластового давления возникает в результате периодического включения/отключения нагнетательных и добывающих скважин, изменения объема нагнетаемого вытесняющего агента и добываемой из пласта жидкости.

Как показано в ряде работ использование технологий нестационарного заводнения на ряде месторождений дало значительный эффект [1, 4, 6-9]. Однако, как показывает практика, технологии нестационарного заводнения имеют свойство «старения», т.е. длительное применение одной и той же технологии НЗ приводит к снижению ее эффективности [6].

Опыт применения технологий нестационарного заводнения на залежах высоковязких нефтей небольшой. Имеются данные о снижении вязкостной неустойчивости за счет применения циклического заводнения и существенного улучшения показателей разработки залежей вязких нефтей с вязкостью более 90 мПа·с [1, 7]. Залежи высоковязких нефтей характеризуются резким нарастанием эффекта от нестационарного заводнения и быстрым его снижением. Для поддержания эффекта нестационарного заводнения на этих залежах необходимо часто изменять применяемую технологию.

Как было показано в работе [1] нестационарное заводнение также эффективно в разработке залежей высоковязкой нефти в карбонатных и терригенных коллекторах и даже «в сравнительно однородных пластах, содержащих вязкую нефть» (таблица 1).

В работе [6] было показано, что применение технологий нестационарного воздействия на нефтенасыщенные коллектора более эффективно на тех объектах

разработки, где при прочих равных условиях выше величина соотношения

$$k_{эфф} = \frac{Q_{подвижные}^0}{Q_{извлекаемые}^0},$$

где  $Q_{подвижные}^0$  — величина начальных потенциальных подвижных запасов нефти объекта,  $Q_{извлекаемые}^0$  — величина начальных извлекаемых запасов нефти для стационарной системы разработки. То есть чем больше величина потенциальных подвижных запасов нефти, которые не могут быть освоены действующей стационарной системой разработки, тем выше эффект от применения технологий нестационарного заводнения в сочетании с изменением направления фильтрационных потоков (ИНФП). В связи с данным принципом особое значение приобретают карты недренируемых подвижных запасов нефти, указывающие на области эффективного применения технологий нестационарного заводнения.

При правильном выборе динамики изменения режимов работы скважин, которая не должна допускать избыточно высоких градиентов давления, особенно в призабойной зоне пласта, применение методов нестационарного заводнения месторождений высоковязкой нефти имеет высокий потенциал воздействия на разработку. Значительное увеличение эффективности гидродинамических методов достигается когда они включены в комплексную систему разработки с использованием тепловых, потокоотклоняющих методов, горизонтальных и многоствольных скважин, а также увязаны с введением в эксплуатацию вновь пробуренных скважин и проведением других геолого-технических мероприятий на месторождении.

Однако, применительно к разработке залежей высоковязкой нефти, нестационарное воздействие изучено в недостаточной мере. Имеются лишь отдельные упоминания о применении нестационарного заводнения в разработке залежей высоковязких нефтей. Среди последних работ по данной теме можно назвать работы Владимирова И. В., Пичугина О. Н, Горшкова А. В. Альмухаметовой Э. М.

Рассмотрим применение оптимизации (увеличение дебита жидкости добывающей скважины) при проницаемостной неоднородности. Для этого рассмотрим

**Таблица 1.** Геолого-физические условия применимости методов нестационарного заводнения и циклического воздействия (по данным работы [1])

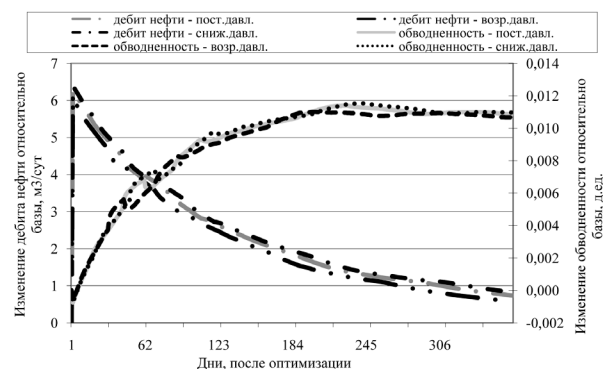
Нефть, вода	Коллектор
Маловязкая легкая нефть, вода с малым содержанием солей, особенно кальция и магния	Песчаный неистощенный, высокопроницаемый, низкопроницаемый, неоднородный
Маловязкая нефть, вода с малым содержанием солей, особенно кальция и магния	Карбонатный неистощенный, высокопроницаемый, трещиноватый, пористый, неоднородный
	Карбонатный заводненный, высокопроницаемый, слаботрещиноватый, неоднородный
Средневязкая, смолистая (активная) парафинистая нефть, вода с малым содержанием солей, особенно кальция и магния	Песчаный неистощенный высокопроницаемый, низкопроницаемый, неоднородный
	Карбонатный неистощенный, высокопроницаемый, трещиновато-пористый, неоднородный
Высоковязкая тяжелая нефть, вода пластовая с большим содержанием солей	Песчаный высокопроницаемый, низкопроницаемый, неоднородный

модель коллектора двойной проницаемости как наиболее ярко выраженную неоднородную среду [5,10].

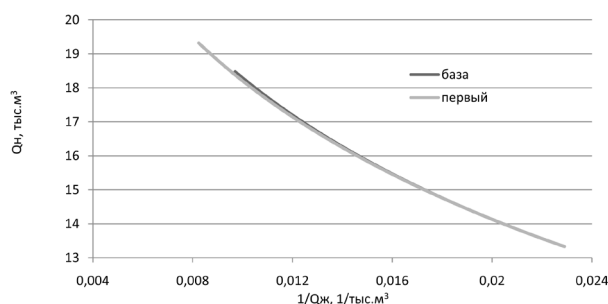
**Применяемая модель.** Исследование выработки запасов нефти из продуктивного пласта при нестационарном заводнении проводилось с использованием гидродинамического симулятора трехфазной фильтрации «Tempest-More» (производитель Roxar) версии 6.7.1. [10]. Коллектор залежи состоит из двух систем: поровые блоки, однородные, высокопроницаемые с пористостью  $m = 0,3$  д.ед. и проницаемостью  $K_p = 1$  мкм<sup>2</sup> и трещины — однородные по своим свойствам во всем объеме залежи, с пустотностью 0,05 д.ед. и проницаемостью  $K_t = 100$  мкм<sup>2</sup>. Начальная нефтенасыщенность порового коллектора  $S_0 = 0,9$  д.ед., трещин — 1,0 д.ед. Система трещин имеет сжимаемость более чем в 20 раз большую сжимаемости поровых блоков.

Вместе с тем необходимо отметить, что в целом на динамику технологических показателей проницаемостная неоднородность коллектора оказывает значительное влияние.

На рисунке 1 приведены изменения дебита нефти и обводненности в результате оптимизации относительно соответствующих базовых вариантов рассмотренных задач. Сразу после оптимизации наблюдается скачкообразное увеличение дебита нефти, при плавно нарастающей обводненности, для всех рассмотренных задач. При этом различие изменений технологических показателей в зависимости от энергетического состояния залежи становится заметным. Наименьший



**Рисунок 1.** Динамика изменения технологических показателей разработки относительно базовых вариантов рассматриваемых задач для коллектора двойной проницаемости



**Рисунок 2.** Характеристики вытеснения Камбарова при постоянном среднем пластовом давлении (первая задача) при ньютоновском течении нефти в коллекторе двойной проницаемости

прирост дебита нефти дает случай, когда в залежи растет среднее пластовое давление.

В рассмотренных задачах для коллектора двойной проницаемости увеличение дебита жидкости сопровождается ростом обводненности. Однако как показано на рисунке 1 возрастание обводненности не превышает 1%. Это приводит к тому, что характеристики вытеснения базового и первого вариантов практически совпадают, хотя формально базовый вариант имеет лучшие условия для нефтевытеснения. На рисунке 2 представлены характеристики вытеснения Камбарова для условий постоянства пластового давления в коллекторе двойной проницаемости.

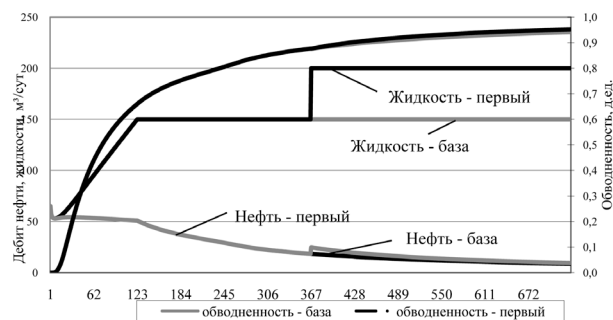
Таким образом, оптимизация работы добывающей скважины для случая коллектора двойной проницаемости выступает как мероприятие, направленное на интенсификацию отборов запасов нефти, т.е. приводит к увеличению дебита нефти при практически неизменной обводненности добываемой продукции.

Рассмотрим как влияет оптимизация (увеличение дебита жидкости) на выработку запасов нефти с неньютоновскими свойствами из коллектора двойной проницаемости. Структурно-механические свойства (СМС) нефти, используемые в модели, описаны выше.

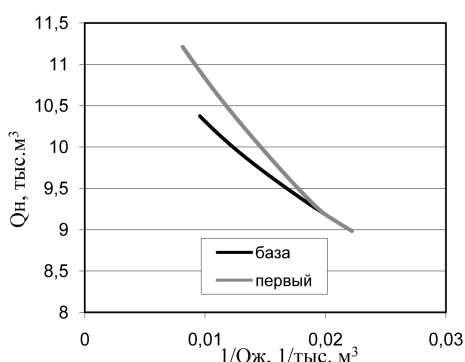
На рисунке 3 представлена динамика технологических показателей разработки для базового варианта и варианта поддержания пластового давления в условиях 100% компенсации отборов закачкой воды в условиях проявления СМС нефти для коллектора двойной проницаемости. Хорошо видно, что в результате увеличения дебита жидкости (оптимизация) происходит и возрастание дебита нефти относительно базового варианта. При этом, в отличие от рассмотренного ранее случая, обводненность добываемой продукции снижается.

В рассмотренных выше задачах неньютоновской фильтрации в коллекторе двойной проницаемости увеличение дебита жидкости сопровождается снижением обводненности. Это приводит к тому, что характеристики вытеснения показывают улучшение качества нефтевытеснения (рисунок 4).

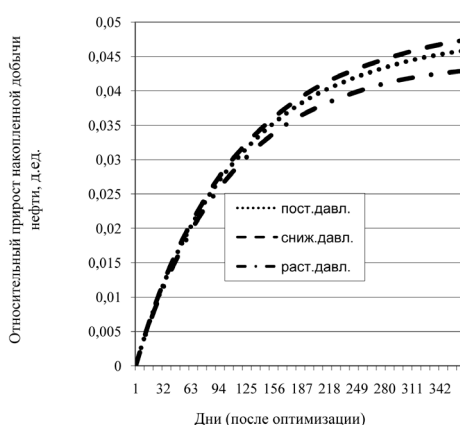
Таким образом, оптимизация работы добывающей скважины для случая коллектора двойной проницаемости при неньютоновском течении нефти выступает



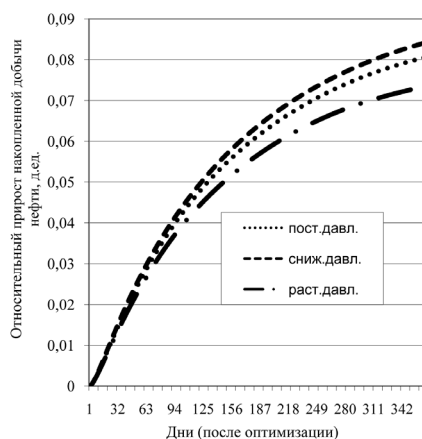
**Рисунок 3.** Динамика технологических показателей разработки для базового и первого варианта в условиях постоянного пластового давления для случая неньютоновского течения нефти в коллекторе двойной проницаемости



**Рисунок 4.** Характеристики вытеснения Камбарова при постоянном среднем пластовом давлении (первая задача) при неньютоновском течении нефти в коллекторе двойной проницаемости



а



б

**Рисунок 5.** Динамика изменения прироста накопленной добычи нефти в долях от базовых вариантов рассматриваемых задач для коллектора двойной проницаемости при ньютоновском (а) и неньютоновском (б) течении нефти

как мероприятие, направленное на увеличение извлекаемых запасов нефти.

В заключение приведем несколько сопоставлений накопленных показателей добычи нефти для разных слу-

чаев разработки коллектора двойной проницаемости. На рисунке 5 представлена динамика изменения прироста накопленной добычи нефти (т.е. величины, равной  $\zeta = \frac{Q_{vi}^t - Q_{bi}^t}{Q_{bi}^t}$ , где  $Q_{vi}^t$  — текущие накопленные отборы по первому варианту  $i$ -й задачи,  $Q_{bi}^t$  — текущие накопленные отборы по базовому варианту  $i$ -й задачи) для коллектора двойной проницаемости при ньютоновском и неньютоновском течениях нефти.

Представленные на рисунке зависимости показывают, что для коллектора двойной проницаемости применение оптимизации при растущем пластовом давлении обладает наименьшим эффектом как для ньютоновской, так и для неньютоновской фильтрации нефти. Как отмечалось выше, это связано как с увеличением проницаемости трещин с ростом давления в трещинной системе, так и со снижением интенсивности обмена флюидами между системами трещин и поровыми блоками. Сопоставление относительного прироста добычи нефти за счет оптимизации для ньютоновского и для неньютоновского режимов фильтрации нефти показывает, что относительный эффект от оптимизации выше для случая неньютоновского течения нефти.

### Выводы

В неоднородном по проницаемости коллекторе (двойной проницаемости), насыщенном высоковязкой нефтью, в результате оптимизации работы добывающей скважины (увеличения дебита жидкости) возможно получение следующих результатов:

- для случая ньютоновского течения нефти — возрастание дебита нефти при незначительном росте обводненности добываемой продукции. В данном случае оптимизация выступает как метод интенсификации отборов запасов нефти.
- для случая неньютоновского течения нефти — возрастание дебита нефти при снижении обводненности добываемой продукции. Характеристики вытеснения при этом указывают на улучшение качества нефтевытеснения и возрастание начальных извлекаемых запасов нефти в области дренажа скважины.
- во всех рассмотренных случаях для коллектора двойной проницаемости применение оптимизации при растущем пластовом давлении обладает наименьшим эффектом как для ньютоновской, так и для неньютоновской фильтрации нефти.
- относительный эффект от оптимизации выше для случая неньютоновского течения нефти.
- оптимизацию работы добывающей скважины (увеличение дебита жидкости) можно рассматривать как метод интенсификации только при разработке коллекторов двойной проницаемости при ньютоновском режиме течения нефти.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Муслимов Р. Х. Современные методы управления разработкой нефтяных месторождений с применением заводнения: учеб. пособие. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2002. 596 с.
- 2 Муслимов Р. Х., Шавалиев А. М., Хамзин Р. Г. Циклическое воздействие и изменение направления фильтрационных потоков на объектах разработки Татарстана // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 1993. № 8. С. 29-37.
- 3 Теоретическое исследование применения нестационарного заводнения в различных геолого-технологических условиях разработки залежей высоковязкой нефти / И. В. Владимиров, М. М. Валиев, Э. М. Альмухаметова, Р. П. Варисова, Н. Х. Габдрахманов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. Уфа: ИПТЭР. 2014. № 3 (97). С. 33-44.
- 4 Гавура В. Е. Геология и разработка нефтяных и газонефтяных месторождений. М.: ВНИИОЭНГ. 1995. 496 с.
- 5 Владимиров И. В., Андреев Д. В., Егоров А. Ф. Исследование эффективности нестационарного воздействия на коллекторы двойной пористости // Нефтепромышленное дело. М.: ВНИИОЭНГ. 2011. № 7. С. 11-14.
- 6 Владимиров И. В. Нестационарные технологии нефтедобычи (этапы развития, современное состояние и перспективы). М.: ВНИИОЭНГ. 2004. 216 с.
- 7 Владимиров И. В., Альмухаметова Э. М., Варисова Р. П. Влияние увеличения дебита жидкости добывающей скважины на эффективность выработки запасов нефти // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2014. С. 60-61.
- 8 Гафаров Ш. А., Фаизов Р. Г., Кабиров М. М. Повышение эффективности циклического воздействия на неоднородные нефтяные пласты. Уфа: «Монография», 2007. 74 с.
- 9 Крянев Д. Ю. Нестационарное заводнение. Методика критериальной оценки выбора участков воздействия: монография. М.: ВНИИнефть, 2008. 209 с.
- 10 Владимиров И. В., Альмухаметова Э. М., Варисова Р. П. Влияние изменения

режима работы добывающей скважины на эффективность выработки запасов нефти. Теория // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. Уфа. 2014. № 2 (96). С. 15-27.

## REFERENCES

- 1 *Muslimov A. D. Sovremennye metody upravleniya razrabotkoj nefjtjanyh mestorozhdenij s primeneniem zavodnenija: ucheb. posobie* [Modern methods of management development of oil fields with flooding. Textbook]. Kazan, Kazan University Publ., 2002, 596 p. [in Russian].
- 2 *Muslimov A. D., Shavaliyev A. M., Khamzin R. G. The cyclical impact and change the direction of filtration flows at the sites of development of Tatarstan. Geologija, geofizika i razrabotka nefjtjanyh mestorozhdenij - Geology, geophysics and the development of oil fields*, 1993, no. 8, pp. 29-37. [in Russian].
- 3 *Vladimirov I. V., Veliyev M. M., Almkhametova E. M., Varisova R. R., Gabdrakhmanov N. X. Theoretical study of the application of unsteady water flooding in different geological and technological conditions of development of deposits of heavy oil. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov - Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*. Ufa, 2014, no. 3(97), pp. 33-44. [in Russian].
- 4 *Gavura V. E. Geologija i razrabotka nefjtjanyh i gazonefjtjanyh mestorozhdenij* [Geology and development of oil and gas and oil fields]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1995. 496 p. [in Russian].
- 5 *Vladimirov I. V., Andreev D. V., Egorov A. F. Investigation of the effectiveness of non-stationary effects on reservoir dual porosity. Neftepromyslovoe delo - Petroleum Engineering*, 2011, no. 7, pp. 11-14. [in Russian].
- 6 *Vladimirov I. V. Nestacionarnye tehnologii neftedobychi (jetapy razvitija, sovremennoe sostojanie i perspektivy)* [Unsteady oil production technology (stages of development, the current state and prospects)]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2004. 216 p. [in Russian].
- 7 *Vladimirov I. V., Almkhametova, E. M., Varisova R. R. [Effect of increasing the flow rate of liquid producing well on the efficiency of development of oil reserves]. Mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Problemy i metody obespechenija nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefiti, nefteproduktov i gaza»* [Proc. of the int. sci.-pract. conf. «Prob-

lems and methods to ensure the reliability and safety of systems of transportation of oil, oil products and gas». Ufa, 2014, pp. 60-61. [in Russian].

8 *Gafarov Sh. A., Faizov R. G., Kabirov M. M. Povyshenie jeffektivnosti ciklicheskogo vozdejstvija na neodnorodnye nefjtjanye plasty* [Improving the efficiency of cyclical effects on heterogeneous oil reservoirs]. Ufa, Monograph Publ., 2007. 74 p. [in Russian].

9 *Kryanev D. Y. Nestacionarnoe zavodnenie. Metodika kriterial'noj ocenki vybora uchastkov vozdejstvija. Monografija* [Unsteady flooding. Methods of evaluating the selection criterion impact areas. Monograph]. Moscow, VNIIneft Publ., 2008. 209 p. [in Russian].

10 *Vladimirov I. V., Almkhametova, E. M., Varisova R. R. Influence of changing the mode of operation of producing wells on the efficiency of development of oil reserves. Theory. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov - Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2014, no. 2 (96), pp. 15-27. [in Russian].

*Владимиров И. В., д-р техн. наук, профессор кафедры «Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений», ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация*

*I. V. Vladimirov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair «Development and Operation of Gas and Gas Condensate Fields», FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation*

*Варисова Р. Р., преподаватель кафедры «Оборудование нефтехимических заводов», ФГБОУ ВО УГНТУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация*

*R. R. Varisova, Lecturer of the Chair «Equipment of Petrochemical Plants», FSBEI HE USPTU, Branch in the Sterlitamak, the Russian Federation*

*e-mail: VARISOVARR@yandex.ru*

*Альмухаметова Э. М., канд. техн. наук, доцент кафедры «Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений», ФГБОУ ВО УГНТУ, филиал, г. Октябрьский, Российская Федерация*

*E. M. Almkhametova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair «Exploration and Exploitation of Oil and Gas Fields», FSBEI HE USPTU, Branch in the Oktyabrskiy, the Russian Federation*