



ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-105-113>**Влияние неоднородности геологического строения резервуара на режим эксплуатации месторождения / подземного хранилища газа Гарадаг (Азербайджан)**А. А. Фейзуллаев¹, А. Г. Годжаев²¹ Институт геологии и геофизики, Национальная академия наук Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан² ПО «Азнефть», Государственная нефтяная компания Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан fakper@gmail.com**Аннотация**

Подземные нефтегазоносные пласты характеризуются пространственной изменчивостью его строения, вещественного состава и петрофизических свойств слагающих его пород: гранулометрического состава, пористости, проницаемости, структуры и текстуры порового пространства, карбонатности, удельного электрического сопротивления, нефте- и водонасыщенности и других свойств. Режимы разработки и эксплуатации подземного газового хранилища, которые были созданы в истощенных подземных нефтегазовых резервуарах, должны учитывать унаследованный характер отработки залежи. Поэтому выявление особенностей изменения продуктивности скважин является актуальной задачей, решение которой может способствовать созданию более эффективной системы эксплуатации подземного газового хранилища. В работе представлены результаты сравнительного анализа изменения в пространстве продуктивности скважин при эксплуатации подземного хранилища газа Гарадаг (Азербайджан), созданного в истощенной газоконденсатной залежи. Установлен неравномерный характер в изменении продуктивности скважин, который связывается с неоднородностью резервуара (изменением литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств пород). Исследования основывались на анализе изменений в пространстве ряда параметров резервуара: эффективной мощности продуктивного пласта, литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств горных пород. Анализ изменения эффективной мощности и фильтрационно-емкостных свойств пород VII горизонта пластовой толщи газоконденсатного месторождения Гарадаг выполнен по данным геофизических исследований около 40 скважин и более 90 образцов керна. Данные о продуктивности более 90 скважин легли в основу анализа изменения их в пространстве. Анализ изменений продуктивности в пространстве технологических характеристик скважин (по данным 18 скважин) ПХГ Гарадаг выполнен на примере объема циклической закачки и отбора газа в сезоне 2020–2021 гг. В результате проведенных исследований установлен неравномерный в пространстве характер изменения объемов закачиваемого и отбираемого газа на ПХГ Гарадаг, созданного в соответствующем истощенном газоконденсатном резервуаре. Особенности режима эксплуатации подземного хранилища газа хорошо согласуются с особенностями режима разработки залежи (изменением в пространстве продуктивности скважин). Унаследованный характер разработки залежи и эксплуатации подземного хранилища газа обосновывается неоднородностью резервуара, обусловленной пространственной изменчивостью литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств пород. Учет неоднородности резервуара при проектировании режима эксплуатации подземного хранилища газа является важной предпосылкой повышения эффективности его эксплуатации.

Ключевые слова

месторождение, газоконденсатная залежь, подземное хранилище газа, скважина, геологическая характеристика, неоднородность резервуара

Благодарности

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики – Грант № EIF-BGM-4-RFTF-1/2017.


Для цитирования

Фейзуллаев А. А., Годжаев А. Г. Влияние неоднородности геологического строения резервуара на режим эксплуатации месторождения / подземного хранилища газа Гарадаг (Азербайджан). *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):105–113. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-105-113>



GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research article

Influence of geological reservoir heterogeneity on exploitation conditions of Garadagh field / underground gas storage (Azerbaijan)A. A. Feyzullayev¹ , A. G. Gojayev² ¹ Institute of Geology and Geophysics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan² Gas Storage Facility Operation Department of “Azneft” Production Association, State Oil Company of the Azerbaijan Republic (SOCAR), Baku, Republic of Azerbaijan fakper@gmail.com**Abstract**

Underground oil and gas reservoirs (formations) are characterized by spatial variability of their structure, material composition and petrophysical properties of its constituent rocks: particle size distribution, porosity, permeability, structure and texture of the pore space, carbonate content, electrical resistivity, oil and water saturation and other properties. When assessing development and exploitation conditions for underground gas storages, created in depleted underground oil and gas reservoirs, the inherited nature of the reservoir development should be taken into account. Therefore, identifying the features of variations in well productivity is a crucial task, solution of which can contribute to the creation of more efficient system for underground gas storage exploitation. The paper presents the findings of comparative analysis of spatial variations in well productivity during the exploitation of the Garadagh underground gas storage (Azerbaijan), created in the depleted gas condensate reservoir. An uneven nature of the variations in well productivity was established, which was connected with the reservoir heterogeneity (variations in the reservoir lithological composition and poroperm properties). The research was based on the analysis of spatial variations of a number of reservoir parameters: the reservoir net thickness, lithological composition and poroperm properties. The analysis of variations in the net thickness and poroperm properties of the VII horizon of the Garadagh gas condensate field was carried out based on the data of geophysical logging of about 40 wells and studying more than 90 core samples. The data on of more than 90 wells formed the basis for the spacial productivity variation analysis. The analysis of productivity variation in the space of well technological characteristics (based on data from 18 wells) in the Garadagh underground gas storage (UGS) was carried out through the example of the volume of cyclic gas injection and withdrawal in 2020–2021 season. The studies allowed revealing non-uniform spacial variations in the volumes of injected and withdrawn gas at the Garadagh UGS, created in the corresponding depleted gas condensate reservoir. The features of the UGS exploitation conditions are in good agreement with the features of the reservoir development conditions (variations in the well productivity). The inherited nature of the reservoir development and the underground gas storage exploitation is substantiated by the reservoir heterogeneity caused by the spatial variability of the reservoir lithological composition and poroperm properties. Assessing and taking into account the reservoir heterogeneity when designing underground gas storage exploitation conditions should be an important prerequisite for increasing UGS exploitation efficiency.

Keywords

field, gas condensate reservoir, underground gas storage, well, geological characteristics, reservoir heterogeneity

Acknowledgements

The study was prepared with the financial support of the Science Development Foundation (Azerbaijan) under the President of the Republic of Azerbaijan – Grant No. EIF-BGM-4-RFTF-1/2017.

For citation

Feyzullayev A. A., Gojayev A. G. Influence of geological reservoir heterogeneity on exploitation conditions of Garadagh field/underground gas storage (Azerbaijan). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):105–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-105-113>

Введение

Опыт изучения особенностей геологического строения нефтегазовых месторождений, имеющий важное значение при создании подземных хранилищ газа (ПХГ), показал, что при всем их разнообразии в тектоническом, литологическом и гидрогеологическом отношениях для них всех характерна пространственная макро- и микронеоднородность продуктивного пласта. Даже кажущиеся однородными мощные пласты песчаников характеризуются существенной

изменчивостью [1–4]. Неоднородность пласта проявляется в пространственной изменчивости его строения, вещественного состава и петрофизических свойств слагающих его пород: гранулометрического состава, пористости, проницаемости, структуры и текстуры порового пространства, карбонатности, удельного электрического сопротивления, нефти и водонасыщенности и др.

Одной из важнейших гидродинамических характеристик пористой среды, от которой зависит ее про-

пуская способность, является проницаемость пород. Проницаемость существенно влияет практически на все технологические показатели разработки залежи.

Так, например, в результате анализа накопленной добычи нефти на месторождении Северные Бузачи (Казахстан) по скважинам основного фонда первого объекта установлено, что всего 30 скважин (8 % от скважинного фонда) обеспечивают 40 % накопленной добычи нефти. Эти скважины размещаются преимущественно в зонах повышенной трещиноватости и обладают повышенными ареалами дренирования [5].

Таким образом, при освоении нефтегазовой залежи участки с различной проницаемостью вырабатываются неравномерно (опережающим темпом вырабатываются высокопроницаемые прослои и участки), происходит быстрый рост обводненности и снижение темпов отбора нефти, формируются остаточные их запасы в низкопроницаемых зонах коллекторов [5–11].

Изучение характера неоднородности пород в пределах залежи нефти и газа имеет большое значение для подсчета запасов нефти и газа, проектирования ее разработки и контроля за воздействием на пласт. Особое значение приобретает влияние неоднородности на эффективность эксплуатации подземных газохранилищ (ПХГ), которые созданы на базе истощенных залежей.

В связи с этим изучению влияния неоднородности вмещающего подземного резервуара на эффективность эксплуатации ПХГ посвящен целый ряд специальных исследований [12–14].

Очевидно, что при обосновании режимов разработки и эксплуатации ПХГ, которые были созданы в истощенных подземных нефтегазовых резервуарах, необходимо учитывать унаследованный харак-

тер отработки залежи. Поэтому выявление особенностей изменения продуктивности скважин является актуальной задачей, решение которой может способствовать созданию более эффективной системы эксплуатации ПХГ.

Целью данного исследования является изучение продуктивности скважин на примере газоконденсатного месторождения / ПХГ Гарадаг (Азербайджан).

Краткая геологическая характеристика объекта исследования

Месторождение / ПХГ Гарадаг расположено в крайней юго-западной части Апшеронского полуострова, в 30 км от г. Баку. На юге месторождение охватывает широкую мелководную полосу Каспийского моря (рис. 1).

Нефтегазоносная структура Гарадаг, выявленная сейсморазведочными работами, представляет собой смятую антиклинальную складку с крутым ($35\text{--}60^\circ$) южным и более пологим ($30\text{--}35^\circ$) северным крыльями. Ось складки на севере имеет субмеридиональное, а на юге субширотное простирание. Широтная часть Гарадагской складки по своим размерам значительно больше, чем меридиональная. Вдоль оси проходит крупное нарушение с амплитудой смещения $200\text{--}300$ м, имеется также ряд поперечных нарушений [15] (см. рис. 1).

Резервуар газа в VII+VIIa горизонтах Продуктивной толщи (ПТ, нижний плиоцен) состоит из совокупности блоков. В юго-восточной части южного крыла горизонты VII и VIIa объединяются и образуют единый толстый слой песчаников. В северо-западном направлении наблюдается уменьшение общей и эф-

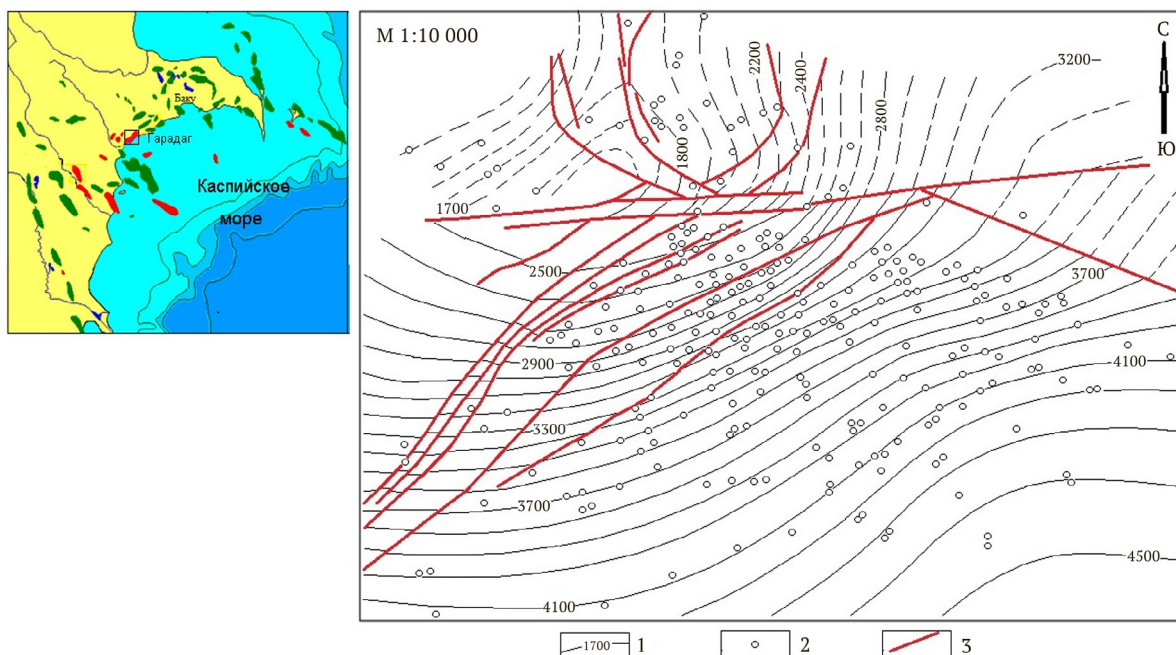


Рис. 1. Положение месторождения / ПХГ Гарадаг и структурная карта по кровле VII горизонта ПТ:
1 – изогипсы; 2 – скважины; 3 – нарушения

Fig. 1. Location of the Garadagh field/UGS and structural map along the top of horizon VII of the reservoir:
1 – structure contours; 2 – wells; 3 – disjunctive dislocations

фективной мощности VII–VIIa горизонтов, от 55–75 м юго-востоке до 10–25 м на северо-западе. Это уменьшение происходит за счет увеличения количества глинистых прослоек.

Эксплуатация месторождения Гарадаг начата в 1939 г. с разработки нефтегазовой залежи в V горизонте ПТ. Основными разрабатываемыми объектами являлись I–VII горизонты (верхний отдел ПТ), VIII горизонт (нижний отдел ПТ) и отложения верхнего миоцена, при средней глубине нефтегазоносных объектов 2750 м. Глубина залегания VII горизонта в сводовой части – 1900 м, в погруженной части – 4250 м (средняя глубина – 3125 м).

Газоконденсатная залежь с нефтяной оторочкой в VII–VIIa горизонтах введена в эксплуатацию в 1955 г. Залежь разрабатывалась без поддержания пластового давления и к концу 1980-х годов она была истощена. За период с 1955 по 1978 г. из VII–VIIa горизонтов было отобрано более 20,5 млрд м³ газа. Начальное пластовое давление равнялось 39 МПа, которое в конце разработки залежи снизилось до 3,5 МПа.

Созданное в истощенных залежах VII–VIIa горизонтов (далее упоминается как VII горизонт) ПТ ПХГ Гарадаг начало эксплуатироваться с 1986 г. В течение двух лет после введения ПХГ в эксплуатацию оно работало в режиме закачки, после чего было переведено в циклический режим «закачка/отбор», с постепенным наращиванием давлений и объема закачиваемого газа. С 2005 г., после передачи ПХГ в ведение ПО Азнефть, работа ПХГ контролируется на регулярной и систематической основе.

Основной объем закачиваемого в VII горизонт газа практически поступает лишь в часть (от трети до половины) первоначального объема резервуара¹.

¹ Каргер М. Д., Fidens S. A., Берман Л. Б., Нейман В. С. и др. Окончательный отчет по Проекту [Построение блочной фильтрационной модели подземного газохранилища Карадаг и рекомендации по системе закачки и отбора газа]. Баку; 2013. 103 с.

Исходные данные и подходы для реализации исследований

Анализ изменения эффективной мощности и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород VII горизонта ПТ газоконденсатного месторождения Гарадаг выполнен по данным геофизических исследований около 40 скважин и более 90 образцов керна.

Данные о продуктивности более 90 скважин легли в основу анализа изменения их в пространстве.

Анализ изменения в пространстве технологической характеристики скважин (по данным 18 скважин) ПХГ Гарадаг выполнен на примере объема циклической закачки и отбора газа в сезоне 2020–2021.

Обработка использованных данных и соответствующие графические построения проводились с помощью стандартных компьютерных программ (главным образом Excel, CorelDRAW и Corel Photo-Paint).

Результаты и их обсуждение

Анализ данных о продуктивности скважин и фазовом соотношении углеводородов (УВ) площади Гарадаг позволил установить неравномерное изменение этих параметров в пространстве. Как видно из рис. 2 и данных табл. 1 северо-восточная часть структуры отличается более высокой газонасыщенностью и, соответственно, более высокими дебитами газа расположенных здесь скважин, а также более высокими значениями газоконденсатного фактора (ГКФ).

На рис. 3 и 4 показаны карты, отражающие особенности изменения в пространстве суммарного объема закачиваемого и отбираемого из скважин газа на ПХГ Гарадаг.

Сравнение характера изменения в пространстве продуктивности скважин при разработке залежи и объема закачиваемого и отбираемого из скважин газа на ПХГ, указывает на определенную их схожесть. В обоих случаях скважины с высокими показателями приурочены преимущественно к северной, северо-восточной, присводовой части структуры.

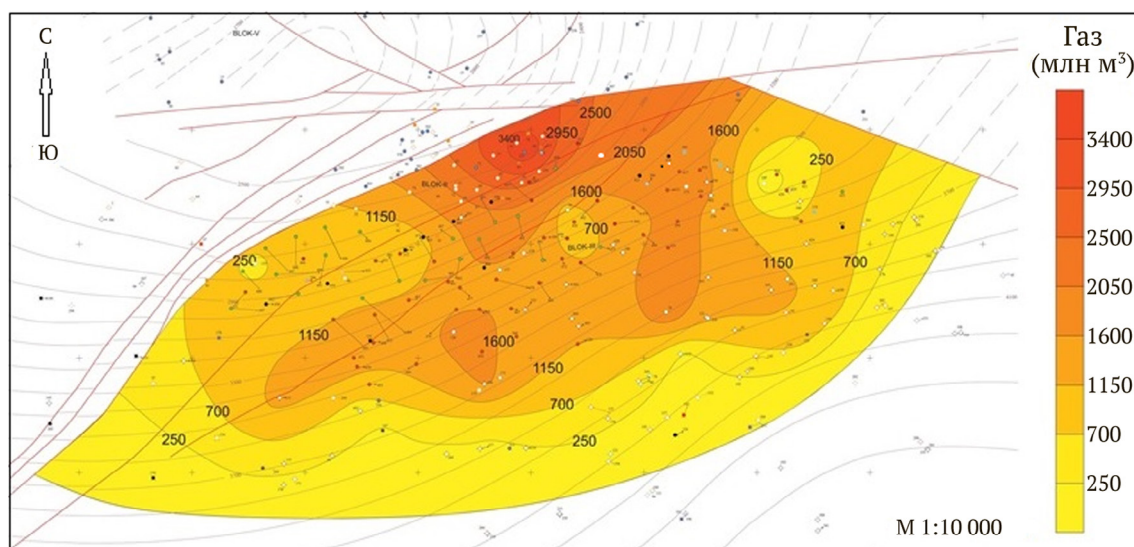


Рис. 2. Газоконденсатная залежь Гарадаг. Изменение в пространстве продуктивности скважин

Fig. 2. Garadagh gas condensate reservoir. Spatial variations of well productivity

Таблица 1 / Table 1

**Начальные газоконденсатный фактор
и выход конденсата в скважинах, расположенных
в разных частях структуры**

Initial gas-condensate ratio and condensate yield in wells
located in different parts of the structure

Положение скважины	№ скв.	Глубина фильтра, м	ГКФ, м ³ /т	Выход конденсата, г/см ³
Присводовая часть	140	2945	7631	131
» – «	155	2646–2661		145
» – «	212	3092–3129		136
Средняя часть	120	3310–3410	7000	143
ЮВ часть	105	3850–3944	5225	191
» – «	130	3993–4033		136
» – «	78	3815–3823	5200	192

Это позволяет сделать вывод о том, что параметры скважин как при разработке залежи, так и при эксплуатации ПХГ, определяются геологическими факторами, связанными со свойствами (неоднородностью) резервуара. Для проверки этого заключения был выполнен анализ изменения в пространстве ряда параметров резервуара: эффективной мощности продуктивного пласта, литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород.

На рис. 5 и 6 показаны изменения в пространстве эффективной мощности продуктивного горизонта и песчанности пород резервуара, согласно которым значения этих параметров увеличиваются с ЮЗ на СВ.

Изменение в пространстве ФЕС пород резервуара имеет более дифференцированный характер (рис. 7). Тем не менее наглядно видны приуроченности наибольших значений пористости и проницаемости пород и наименьших – карбонатности – к присводовой части складки.

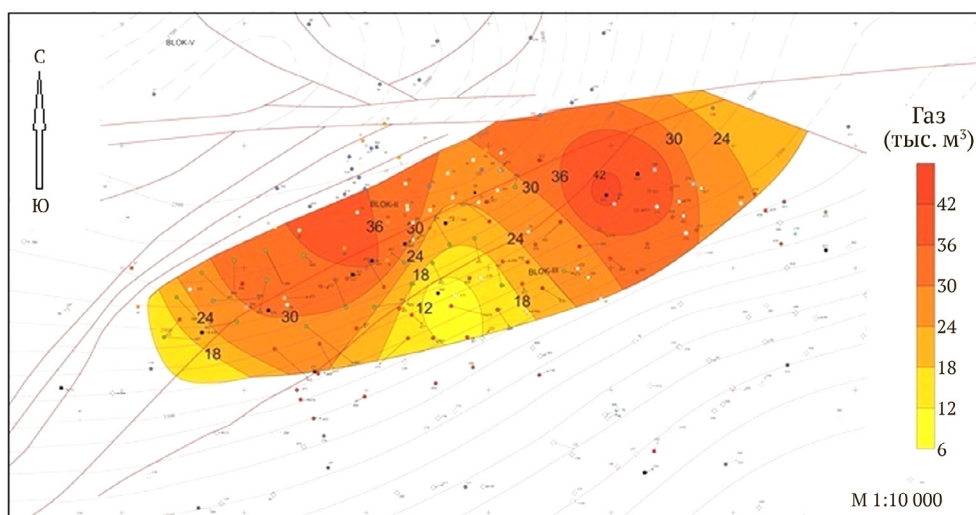


Рис. 3. ПХГ Гарадаг. Изменение в пространстве приемистости (объема закачанного газа) скважин

Fig. 3. Garadagh UGS. Spatial variations of well injectivity (volume of injected gas)

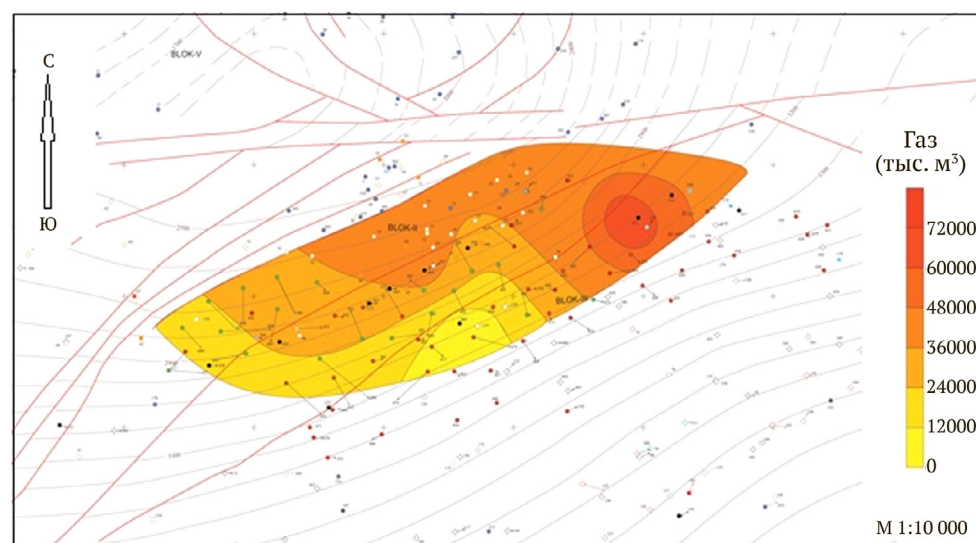


Рис. 4. ПХГ Гарадаг. Изменение в пространстве объема отбираемого из скважин газа

Fig. 4. Garadagh UGS. Spatial variations in the volumes of withdrawn gas (from wells)

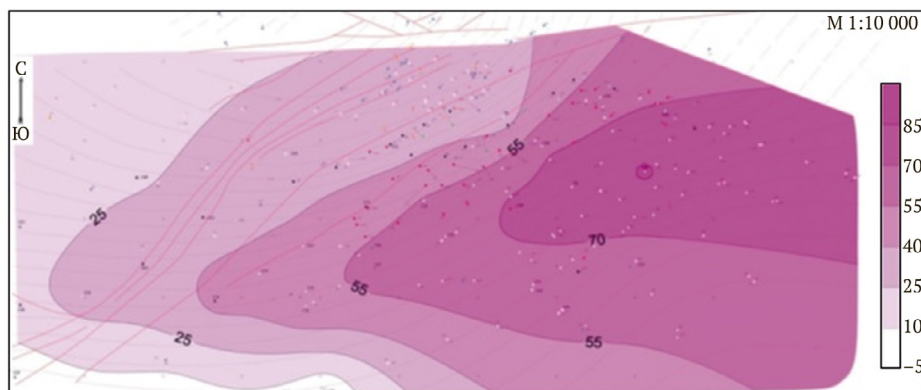


Рис. 5. Карта изменения по площади эффективной толщины VII горизонта ПТ месторождения / ПХГ Гарадаг

Fig. 5. Map of net thickness variations of horizon VII of the Garadagh field/UGS reservoir

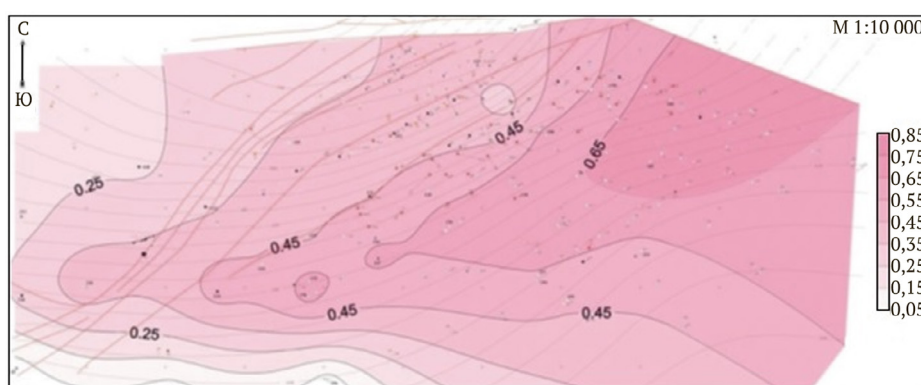


Рис. 6. Карта изменения песчанистости VII горизонта ПТ месторождения / ПХГ Гарадаг

Fig. 6. Map of net-to-gross variations in horizon VII of the Garadagh field/UGS reservoir

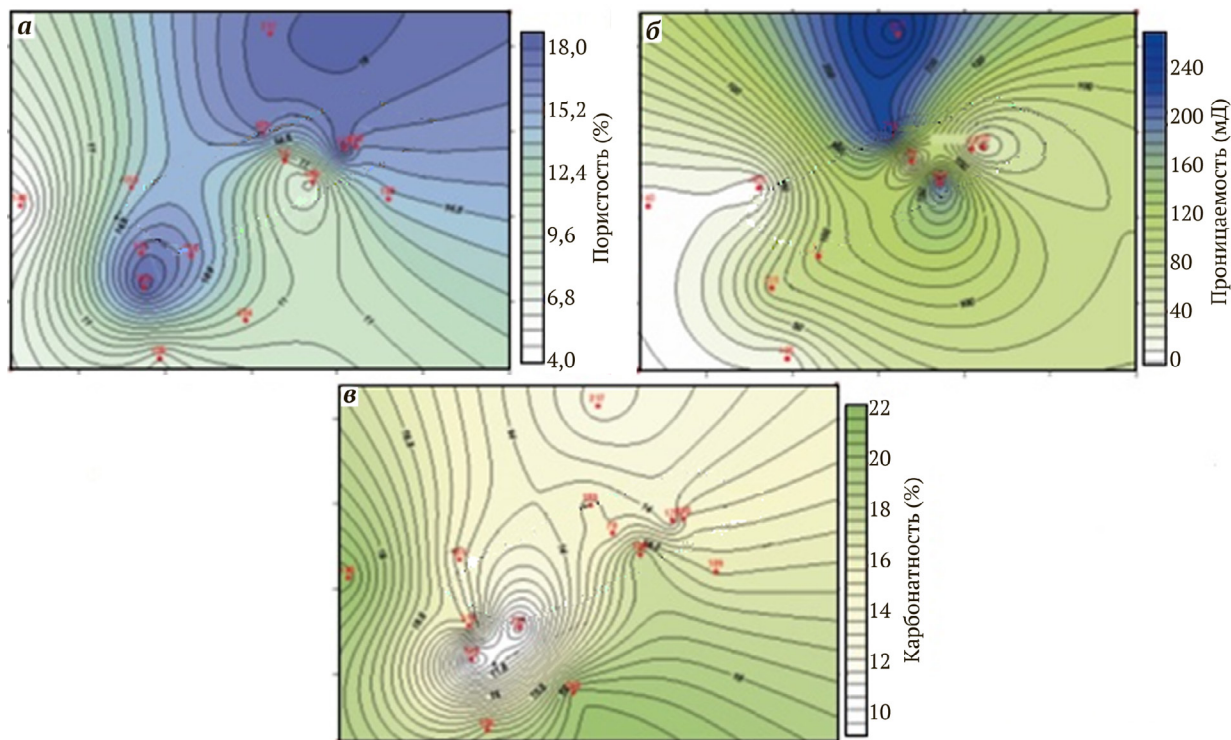


Рис. 7. Изменение по площади пористости (а), проницаемости (б) и карбонатности (в) пород VII горизонта ПТ месторождения / ПХГ Гарадаг (пунктиром указаны контуры ПХГ)

Fig. 7. Spatial variations of porosity (a), permeability (b) and carbonate content (c) in horizon VII of the Garadagh field/UGS reservoir (the dotted line indicates the UGS contours)

Изменчивость в пространстве литологического состава (коэффициент песчаности – Кпес.) и ФЕС пород отражается на количестве и качестве газоконденсатной продукции скважин (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Начальные значения газоконденсатного фактора и выхода конденсата в скважинах в зависимости от литологического состава и ФЕС пород

Initial values of gas-condensate ratio and condensate yield in wells depending on the reservoir lithological composition and poroperm properties

Скважина	Кпес.	Начальные параметры		ФЕС пород	
		ГКФ, м³/т	Выход конденсата, г/см³	Пористость, %	Проницаемость, мД
140	0,15...0,25	7631	131	4,2	3,1
120	0,55...0,65	7000	143	12,5	118
105	>0,65	5225	191	14,2	105

Неоднородность ФЕС пород резервуара находит свое отражение в изменении их газонасыщенности не только по площади, но и по разрезу VII горизонта, выявленного по данным газового каротажа.

Согласно осредненным газокоротажным кривым, приведенным на рис. 8, разрез скважины 473, расположенной в зоне с относительно благоприятными ФЕС пород, характеризуется более высоким содержанием УВ газов, в сравнении со скважиной 474, расположенной в зоне с относительно низкими ФЕС пород.

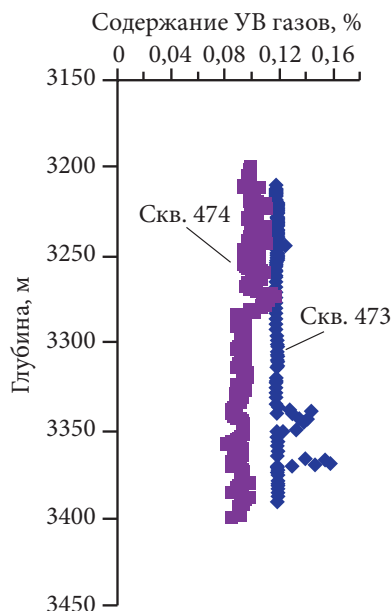


Рис. 8. Изменения по разрезу VII горизонта содержания УВ газов (по данным газового каротажа) в скважине 473 (расположена в зоне с благоприятными ФЕС пород) и скважине 474 (расположена в зоне с относительно низкими ФЕС пород)

Fig. 8. Variations in HC gases content along VII horizon (based on gas logging data) in well 473 (located in the area with favorable reservoir poroperm properties) and well 474 (located in the area with relatively unfavorable reservoir poroperm properties)

Особенности изменения ФЕС пород в пространстве определяют и режим эксплуатации ПХГ Гарадаг. Данные, представленные в табл. 3, свидетельствуют о том, что объемы закачки и отбора газа в период 2010–2012 гг. ниже в скважинах, расположенных в зоне с низкими ФЕС, в сравнении со скважинами, расположенными в зоне с более благоприятными значениями ФЕС горных пород.

Таблица 3 / Table 3

Объемы закачки и отбора газа на ПХГ Гарадаг в период 2010–2012 гг. в зависимости от ФЕС пород

Gas injection and withdrawal volumes at the Garadagh UGS in 2010–2012 depending on reservoir poroperm properties

Зоны / № скв.	Объемы закачки и отбора газа, тыс. м³			
	Сезон 2010–2011		Сезон 2011–2012	
	Закачка	Отбор	Закачка	Отбор

С низкими ФЕС:

Скв. 453	28 698	26 703	33 768	34 632
Скв. 458	23 666	29 301	30 724	35 129
Скв. 467	12 783	24 982	29 199	34 460
Скв. 470	7766	9915	11 412	10 584
Скв. 471	13 212	10 146	27 136	26 852
Среднее	17 225	20 209	26 448	28 331

С высокими ФЕС:

Скв. 450	59 567	48 508	59 035	60 876
Скв. 456	25 725	33 621	45 512	56 604
Скв. 459	47 483	45 703	55 544	49 788
Скв. 464	57 196	41 043	58 066	54 157
Скв. 465	54 066	44 157	60 528	52 264
Среднее	48 807	42 606	55 737	54 738

Таким образом, проведенный выше анализ подтверждает, что режим разработки залежи и эксплуатации ПХГ в значительной мере зависит от пространственной неоднородности резервуара.

Заключение

В результате проведенных исследований установлен неравномерный в пространстве характер изменения объемов закачиваемого и отбираемого газа на ПХГ Гарадаг, созданного в соответствующем истощенном газоконденсатном резервуаре.

Особенности режима эксплуатации ПХГ хорошо согласуются с особенностями режима разработки залежи (изменением в пространстве продуктивности скважин).

Унаследованный характер разработки залежи и эксплуатации ПХГ обосновывается неоднородностью резервуара, обусловленной пространственной изменчивостью литологического состава и ФЕС пород.

Учет неоднородности резервуара при проектировании режима эксплуатации ПХГ является важной предпосылкой повышения эффективности его эксплуатации.



Список литературы

1. Bonnell B., Hurich Ch. *Characterization of reservoir heterogeneity: an investigation of the role of cross-well reflection data*. Recorder, Canadian Society of Exploration Geophysicists. 2008;33(2):32–37. URL: <https://csegrecorder.com/articles/view/characterization-of-reservoir-heterogeneity>
2. Пулькина Н. Э., Зими́на С. В. *Изучение неоднородности продуктивных пластов*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2012. 79 с. URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PULKINANE/Educational_work/Tab/Study_inhomogeneous_formation_productivity.pdf
3. El-Deek I., Abdullatif O., Korvin G. Heterogeneity analysis of reservoir porosity and permeability in the Late Ordovician glacio-fluvial Sarah Formation paleovalleys, central Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017;(10):400. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3146-2>
4. Harraz H. Z. *Reservoir heterogeneity*. Elsevier Inc.; 2019. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25332.30080>
5. Соляной П. Н. *Оптимизация систем разработки залежей нефти с неоднородным коллектором сложного строения (на примере юрских отложений месторождений Кумколь и Северный Бузачи)*. [дисс. ... канд. техн. наук]. Уфа; 2018. 152 с.
6. Durlafsky L. J. An approximate model for well productivity in heterogeneous porous media. *Mathematical Geology*. 2000;(32):421–438. <https://doi.org/10.1023/A:1007521831889>
7. Белозёров В. Б. Влияние фациальной неоднородности терригенных коллекторов на разработку залежей углеводородов. *Известия Томского политехнического университета*. 2011;319(1):123–130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16463780>
8. Naderi M., Rostami B., Khosravi M. Effect of heterogeneity on the productivity of vertical, deviated and horizontal wells in water drive gas reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015;23:481–491. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.02.027>
9. Данилов Д. С., Хакимзянов И. Н., Петров В. Н. Повышение эффективности разработки неоднородных терригенных коллекторов на примере бобриковских отложений Ново-суксинского нефтяного месторождения. В: *Булатовские чтения. Материалы IV Международной научно-практической конференции (31 марта 2020 г.)*. 2020;2:170–175. URL: <http://id-yug.com/images/id-yug/Bulatov/2020/2/PDF/2020-2-170-175.pdf>
10. Мингазутдинова Р. Ф., Ибрагимов И. И. О размещении добывающих и нагнетательных скважин при неоднородности пласта-коллектора по проницаемости. В: *Булатовские чтения. Материалы IV Международной научно-практической конференции (31 марта 2020 г.)*. 2020;2:321–323. URL: <http://id-yug.com/images/id-yug/Bulatov/2020/2/PDF/2020-2-321-323.pdf>
11. Фейзуллаев А. А., Велиева Э. Б., Рамазанов Р. А., Исмаилова Г. Г. Об изменении петрофизических свойств пород в связи с падением давления в длительно разрабатываемых нефтегазовых месторождениях. *Новости геофизики в Азербайджане*. 2013;(3):3–14.
12. Зубарев С. А. *Развитие технологий мониторинга за объектом подземного хранения газа (На примере Центрального ПХГ)*. [автореф. дисс.... канд. техн. наук]. Ухта; 2010. 21 с.
13. Семенов Е. О. *Особенности формирования и оценка коллекторских и экранирующих свойств терригенных пород при создании подземных хранилищ газа в водоносных пластах* [автореф. дисс.... канд. геол.-мин. наук]. М.; 2010. 22 с.
14. Фейзуллаев А. А., Годжаев А. Г., Исмаилова Г. Г., Мирзоева Д. Р. Анализ влияния литофациальной неоднородности резервуара на режим эксплуатации подземного газохранилища Галмас (Азербайджан). *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2017;12(3):1–13. https://doi.org/10.17353/2070-5379/30_2017
15. Ализаде А. А. (ред.) *Геология Азербайджана*. Том VII. Нефть и газ. Баку: Nafta-Press; 2008. 672 p.

References

1. Bonnell B., Hurich Ch. *Characterization of reservoir heterogeneity: an investigation of the role of cross-well reflection data*. Recorder, Canadian Society of Exploration Geophysicists. 2008;33(2):32–37. URL: <https://csegrecorder.com/articles/view/characterization-of-reservoir-heterogeneity>
2. Pulkina N. E., Zimina S. V. *Study of reservoir heterogeneity*. Manual for graduate students. Tomsk: Publ. House of Tomsk Polytechnical University; 2012. 79 p. (In Russ.). URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PULKINANE/Educational_work/Tab/Study_inhomogeneous_formation_productivity.pdf
3. El-Deek I., Abdullatif O., Korvin G. Heterogeneity analysis of reservoir porosity and permeability in the Late Ordovician glacio-fluvial Sarah Formation paleovalleys, central Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017;(10):400. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3146-2>
4. Harraz H. Z. *Reservoir heterogeneity*. Elsevier Inc.; 2019. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25332.30080>
5. Solyanoi P. N. *Optimization of development methods for oil deposits with heterogeneous reservoir of complex structure (through the example of the Kumkol and Severny Buzachi Jurassic deposits* [Ph.D. thesis in Engineering Science]. Ufa; 2018. 152 p. (In Russ.).
6. Durlafsky L. J. An approximate model for well productivity in heterogeneous porous media. *Mathematical Geology*. 2000;(32):421–438. <https://doi.org/10.1023/A:1007521831889>



7. Belozerov V. B. Influence of facies heterogeneity of terrigenous reservoirs on hydrocarbon deposit development. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2011;319(1):123–130. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16463780>
8. Naderi M., Rostami B., Khosravi M. Effect of heterogeneity on the productivity of vertical, deviated and horizontal wells in water drive gas reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015;23:481–491. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.02.027>
9. Danilov D. S., Khakimzyanov I. N., Petrov V. N. Efficiency increase of development for terrigenous collectors on the example bobrikovian reservoirs of Novo-Suksinskoye oil field. In: *Readings of A. I. Bulatov. Materials of IV International scientific and practical conference (on March 31, 2020)*. (In Russ.). 2020;2:170–175. URL: <http://id-yug.com/images/id-yug/Bulatov/2020/2/PDF/2020-2-170-175.pdf>
10. Mingazutdinova R. F., Ibragimov I. I. About location of production and injection wells with the heterogeneity of the reservoir permeability. In: *Readings of A. I. Bulatov. Materials of IV International scientific and practical conference (on March 31, 2020)*. 2020;2:321–323. (In Russ.). URL: <http://id-yug.com/images/id-yug/Bulatov/2020/2/PDF/2020-2-321-323.pdf>
11. Feyzullayev A. A., Valiyeva E. B., Ramazanov R. A., Ismaylova G. G. About change of petrophysical properties of rocks in connection with pressure drop in long developed petroleum fields. *Geophysics News in Azerbaijan*. 2013;(3):3–14. (In Russ.)
12. Zubarev S. A. *Development of monitoring technologies for an underground gas storage facility (through the example of the Central UGS facility)*. [Ph.D. thesis in Engineering Science]. Ukhta; 2010. 21 p. (In Russ.).
13. Semenov E. O. *Features of formation and assessment of poroperm properties of terrigenous rocks for creation of underground gas storages in aquifers*. [Abstract of Ph.D. Thesis in Geol.-Min. Sciences]. Moscow; 2010. 22 p. (In Russ.).
14. Feyzullayev A. A., Gojayev A. G., Ismaylova G. G., Mirzoyeva D. R. Analysis influence of the reservoir lithofacial heterogeneity of the operating mode of the underground gas storage Galmas (Azerbaijan). *Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*. 2017;12(3):1–13. https://doi.org/10.17353/2070-5379/30_2017
15. Alizade A. A. (ed.) *Geology of Azerbaijan*. Vol. VII. Oil and Gas. Baku: Nafta-Press; 2008. 672 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Акпер Акпер оглы Фейзуллаев – доктор геолого-минералогических наук, профессор, действительный член Национальной академии наук Азербайджана, Институт геологии и геофизики, Национальная Академия Наук Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан, Scopus ID [24170958500](#), e-mail: fakper@gmail.com

Араз Гидаят оглы Годжаев – Управление эксплуатации газовых хранилищ, ПО «Азнефть», Государственная Нефтяная Компания Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан, Scopus ID [57222324518](#)

Information about the authors

Akper A. Feyzullayev – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, Institute of Geology and Geophysics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan, Scopus ID [24170958500](#), e-mail: fakper@gmail.com

Araz G. Gojayev – Gas Storage Facility Operation Department, “Azneft” Production Association, State Oil Company of Azerbaijan Republic (SOCAR), Baku, Republic of Azerbaijan, Scopus ID [57222324518](#)

Поступила в редакцию 17.04.2021

Поступила после рецензирования 04.06.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Received 17.04.2021

Revised 04.06.2021

Accepted 15.06.2021