

УДК 622.691.2

DOI: 10.46698/VNC.2024.24.13.013

Оригинальная статья

Геологические и технико-экономические аспекты проектирования подземных хранилищ газа в пластах-коллекторах

Р.А. Гасумов¹, Э.Р. Гасумов², В.М. Валиев², Ф. Мусаева²

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355000,
г. Ставрополь, ул. Ленина, 419, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru;

² Азербайджанский технический университет, Азербайджан, AZ 1073, г. Баку,
пр. Г. Джавида, 25, e-mail: e.gasumov@gmail.com

Статья поступила: 23.09.2024, доработана: 02.11.2024, принята к публикации: 04.11.2024

Резюме: Актуальность работы. В статье рассмотрены геологические и технико-экономические вопросы создания подземных хранилищ газа (ПХГ) в геологических структурах, с учётом новых требований к технологическому проектированию подземных резервуаров в пластах-коллекторах, обусловленных фактической неравномерностью их эксплуатации. В работе изучены геологические структуры, где созданы ПХГ, и установлено, что подавляющее большинство созданных объектов приурочено к складчатым ловушкам. Результаты изучения геологических и технико-экономических аспектов важно учитывать при проектировании ПХГ, а также для обеспечения герметичности объекта за счет правильного выбора в геологической структуре комплекса непроницаемых пород (покрышек над продуктивной толщей с наличием контрольного горизонта), позволяющих исключить вертикальную миграцию газа из пластов-коллекторов. **Целью исследований** является определение требований к выбору геологической структуры при технологическом проектировании ПХГ в пластах-коллекторах (в истощённых месторождениях), позволяющих обеспечить оптимальный вариант работы ПХГ при неравномерности потребления газа с использованием результатов анализа геологических и технико-экономических факторов. **Методы исследований** включали систематизацию информации и аналитические исследования с использованием промысловой и статистической информации, полученной из различных источников, в том числе из электронных ресурсов. **Объектом исследования** является геологическая, промысловая, геофизическая, гидродинамическая информация о строении пласта-коллектора, для выбора объекта хранилища в геологической структуре для технологического проектирования ПХГ. **Результаты.** На основании анализа и обобщения геологической, промысловой, геофизической, гидродинамической информации предложены требования к выбору геологической структуры при технологическом проектировании ПХГ в пластах-коллекторах, позволяющие регламентировать оптимальную и безопасную эксплуатацию залежи в многофункциональных условиях (значительные изменения объёмов отбора-закачки газа, продолжительность периода отбора в условиях неравномерности потребления). Расчёт по матрице вариантов с привлечением балансовой модели, предусматривающий разное соотношение объёмов активного и буферного газа, позволяет оптимизировать процесс выбора приемлемых вариантов проектирования режима работы подземного хранилища по пластовой части.

Ключевые слова: геология, пласт-коллектор, ПХГ, горизонт, месторождения, водоносный, разрез, скважина.

Для цитирования: Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р., Валиев В.М., Мусаева Ф. Геологические и технико-экономические аспекты проектирования подземных хранилищ газа в пластах-коллекторах. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14.(4): 152-165. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.13.013

DOI: 10.46698/VNC.2024.24.13.013

Original paper

Geological and technical-economic issues of designing underground gas storage facilities in reservoir formations

R.A. Gasumov¹, E.R. Gasumov², V.M. Veliyev², F. Musayeva²

¹ North Caucasian Federal University, 419 Lenina Str., Stavropol 355000, Russian Federation, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru;

² Azerbaijan Technical University, 25 G. Javid Ave., Baku AZ 1073, Azerbaijan, e-mail: e.gasumov@gmail.com

Received: 23.09.2024, revised: 02.11.2024, accepted: 04.11.2024

Abstract: Relevance. The article considers geological and technical-economic issues of creating underground gas storage facilities (UGS) in geological structures, taking into account new requirements for the technological design of underground reservoirs in carrier beds, due to the actual unevenness of their operation. The main UGS are built in depleted gas, gas condensate and oil fields and in aquifers, as well as in a small number of rock salt deposits, and are classified into objects of simple and complex geological structure. **The paper studies** the geological structures where UGS have been created, and it was found that the overwhelming majority of created objects are confined to fold traps and brachyanticlines. The results of the geological information analysis showed that most reservoir beds are represented by terrigenous rocks. The results of the study of geological and technical and economic aspects are important to take into account when designing UGS facilities, as well as to ensure the tightness of the facility through the correct choice of a complex of impermeable rocks in the geological structure, allowing to exclude vertical migration of gas from the reservoir beds. **The aim** of the research is to determine the requirements for the choice of a geological structure in the technological design of UGS in reservoir beds, allowing to ensure the optimal option for UGS operation with uneven gas consumption using the results of the analysis of geological and technical and economic factors. **The research methods** included systematization of information and analytical studies using field and statistical information obtained from various sources, including electronic resources. **Results.** Based on the analysis and generalization of geological, field, geophysical, hydrodynamic information, the requirements are proposed for selecting a geological structure in the technological design of UGS in reservoirs, allowing to regulate optimal and safe operation of the deposit in multifunctional conditions. Calculation according to the matrix of options using the balance model, providing for different ratios of active and buffer gas volumes, allows to optimize the process of selecting acceptable options for designing the operating mode of an underground storage facility for the reservoir part.

Keywords: geology, reservoir, underground gas storage, horizon, depleted field, aquifer, section, well.

For citation: Gasumov R.A., Gasumov E.R., Veliyev V.M., Musayeva F. Geological and technical-economic issues of designing underground gas storage facilities in reservoir formations. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 152-165. DOI: 10.46698/VNC.2024.24.13.013

Введение

Технология создания подземного хранилища природного газа (ПХГ) в геологической структуре (ГС) – это выбор пласта-коллектора (П-К) с соответству-

ющими параметрами (наличие ловушки, хорошей фильтрации и коллекторских свойств, необходимой ёмкости – объёма залежи, отсутствие несплошностей), отвечающими требованиям создания подземного резервуара [Gasumov et al., 2020; Mu et al., 2019]. Одной из основных задач технологического проектирования (ТП) сооружения ПХГ является, выбор в качестве ёмкости (объём хранилища) порового пространства П-К преимущественно истощённых углеводородных (УВ) месторождений или водоносных структур. При создании ПХГ основными обязательными условиями являются наличие: ловушки П-К, непроницаемых перекрывающих пород (покрышки). Ловушки П-К по условиям их образования подразделяются на складчатые, разрывные, стратиграфические и литологические, комбинированные.

В последние годы для создания ПХГ также используется ГС, состоящая из отложений каменной соли. Важными условиями при создании ПХГ, в независимости от выбранной ГС, являются обеспечение герметичности подземного резервуара и недопущение возможного негативного воздействия на окружающую среду (в том числе выбросов метана), а также соблюдение требований экологической безопасности.

Геологическая составляющая при ТП ПХГ является определяющей при выборе объекта, но, также, необходимо учитывать экономические, технические, технологические, экологические и другие факторы [Гасумов, Гасумов, 2023; Пономарев, 2016; Uliasz-Misiak, Misiak, 2024]. Сооружение ПХГ по своим технико-экономическим показателям (ТЭП) существенно отличается от разработки месторождений УВ, так как, работает в циклическом режиме и сезонно проводится закачка с последующим отбором. В связи с этим геологические и экономические аспекты ТП ПХГ в П-К имеют важное значение, так как, способствуют созданию подземного резервуара и обеспечивают надёжность, долговечность и герметичность объекта. А решение этих задач при ТП ПХГ требует выполнения определённых условий при выборе П-К, для чего является важным проведение исследований подземных резервуаров, созданных в различных ГС и регионах России. Актуальным является изучение опыта эксплуатации подземных резервуаров, с учётом влияния различных внешних и внутренних факторов на бесперебойность работы при неравномерном отборе газа, при этом особый интерес представляют результаты анализа аспектов геологического и технико-экономического характера (ТЭХ), присущих эксплуатируемому и проектируемому ПХГ в РФ.

Методы исследования

При проведении исследований и изучении проблемы использовались геологические, промысловые и статистические данные, анализировались горно-геологические условия эксплуатируемых и проектируемых ПХГ.

Результаты работы и их обсуждение

ПХГ представляют собой комплекс инженерно-технических сооружений, созданных в ГС, в том числе в истощённых месторождениях УВ, имеющих необходимые «природные» ёмкости для закачки газа в пласты под давлением, превышающим пластовое, позволяющие ему оставаться в П-К в газообразном состоянии. Находящийся в П-К объём газа оценивается как активный (отбираемый из залежи

при эксплуатации), и буферный (не подлежащий отбору и необходимый для обеспечения стабильной работы ПХГ). Объёмы определяются исходя из геометрических, горно-геологических параметров залежи (ГС), ФЕС П-К, минимального и максимального давлений в ПХГ при эксплуатации, а также режима работы (в том числе закачек-отборов газа), и а ТП рассчитываются теоретическим путем.

Основным обязательным условием сооружения ПХГ (underground gas storage – UGS) является наличие резервуара (ловушки) с непроницаемыми крышками. ПХГ классифицируются на объекты простого и сложного геологического строения и, как известно, ловушки П-К по условиям их образования подразделяются на складчатые, разрывные, стратиграфические и литологические, комбинированные [Ermolaev et al., 2022; Шиповалов и др., 2022].

Проведённый анализ показывает, что подавляющее большинство созданных ПХГ на территории России приурочено к складчатым ловушкам. Уникальными являются объекты хранения, созданные в мелкосопочной структуре с моноклиальным подъёмом (Гатчинское ПХГ) и в протяжённом валлообразном поднятии, осложнённом пятью куполами (Невское ПХГ). Характеристики структурных ловушек, действующих ПХГ с указанием ФЕС П-К приведены в таблице 1. Как видно из таблицы по промысловым данным, П-К в большинстве действующих ПХГ на территории РФ являются терригенными и карбонатными [Шиповалов и др., 2022; Пономарев, 2016; Alani, Okechukwu, 2019; Fyk, Donsky, 2019] (рис. 1).



Рис. 1. Показатели пластов-коллекторов действующих подземных хранилищ газа /

Fig. 1. Reservoir performance of operating underground gas storage facilities

Таблица 1 / Table 1

Сведения об эксплуатируемых подземных хранилищах газа на территории России /
Information on underground gas storage facilities in operation in Russia

Объект / Object	Начало создания / Start of creation	Объём газа, м³ / Gas volume, m³		Буферный объём газа, м³ / Buffer volume of gas, m³		Производительность отбора, млн м³ / Selection capacity, million m³		Пластовое давление, МПа / Reservoir pressure, MPa		Количество скважин, шт / Number of wells, pieces	
		общий general	активный / active всего / отбираемый / total selected	общий general	остаточ- ный / residual	максимальная maximal	минимальная / minimal	максимальное maximal	минимальное / minimal	эксплуа- тационных / operational	наблюда- тельных / observational
Песчано-Уметское / Peshchano-Umetское	1966	4501,6	2400	2400	2101,6	496	21,6	12,74	4,50	125	11
Елшано-Курдюмское / Elshano-Kurdyumskoe	1966	4979,2	2710	2710	1688,2	580,8	30,0	10,47	2,34	129	27
Степновское / Stepnovskoe г-т D ₂ V+VI г-т D ₂ IV ^a +IV ^b	1973 - -	10696 7186 3510	5516 3110 2406	5180 4076 1104	- - -	- - -	80,0 40,0 40,0	- 17,77 20,85	- 8,60 6,87	226 142 84	- - -
Кирюшкинское / Kiryushkinskoe	1973	1027,4	336,0	691,4	246,4	2,6	2,6	2,22	1,60	31	-
Аманакское / Amanakskoe	1975	210,0	49,0	161,0	93,0	0,4	0,4	2,11	1,59	5	-
Дмитриевское / Dmitrievskoe	1995	270,4	95,0	175,4	175,4	0,8	0,9	3,92	2,63	26	-
Михайловское / Mikhailovskoe	1995	393,0	167,0	226,0	226,0	1,3	1,4	4,31	2,97	27	-
Щелковское / Shchelkovskoe	1961	3300	1300	2000	2000	-	13,0	10,5	7,60	118	-
Калужское / Kaluzhskoe	1965	630,0	410,0	220,0	220,0	-	15,0	11,27	4,90	38	-
Касимовское / Kasimovskoe	1978	22000	12000	10000	10000	-	130,0	11,27	4,21	331	-
Уязовское / Uvuzazovskoe	1998	5500	2500	3000	3000	-	23,0	11,27	5,39	95	33
Невское / Nevskoe	1980	4670	2000	2670	2670	-	28,0	14,70	7,84	90	77
Гачинское / Gatchinskoe	1963	512	200	309	309	-	1,6	4,30	2,75	42	-
Северо-Ставропольское / North-Stavropol; - Хадумский горизонт / Khadum horizon - Зеленая свита / Zelionaya Svita	-	99500	62930	24450	36570	-	200,0	-	-	847	-
Краснодарское / Krasnodar	1984	90000	56830	20000	33170	16770	160,0	4,06	-	667	9
Кушевское / Kuschchevskoe	1991	13300	6800	6500	6500	1438	42,1	12,15	7,30	155	38
Канчуринское / Kanchurinskoe	1972	6742	4290	4290	2452	724	54,2	16,92	4,90	142	-
Музинское / Musinskoe	1988	687	440	440	247	47	5,17	16,92	4,90	25	--
Пунгинское / Punginskoe	1985	22100	9863	3500	12237	9937	43,0	7,65	6,28	50	13
Удмуртский / Udmurtsky	2001	2260	1070	1190	1190	-	15,2	-	-	-	-
Карашурское / Karashurskoe; - Тульский горизонт / Tulskey horizon - Бобриковский горизонт / Bobrikovsky horizon	-	890	430	460	460	-	7,5	14,71	8,19	24	-
Совхозное / Sovkhoznoe	1984	1370	640	730	730	-	7,7	14,71	9,12	25	-
		9900	7000	2900	2900	1617	70,0	15,10	3,92	110	-

Герметичность ПХГ обеспечивается за счёт наличия в рассматриваемой ГС (ловушке) комплекса непроницаемых пород (покрышек), что препятствует вертикальной миграции природного газа. Результаты анализа показали, что на всех эксплуатируемых ПХГ над продуктивной толщей имеются контрольные горизонты, а фонд контрольных скважин, позволяет судить о наличии межпластовых (вертикальных) перетоков. Исключение составляет Краснодарское ПХГ, особенностью которого является отсутствие проницаемых горизонтов над продуктивной толщей и, следовательно, отсутствие контрольных скважин, что ограничивает возможности увеличения активного объёма закачиваемого газа в ГС. Результаты проведённого анализа показали, что 70% ПХГ на территории России созданы в истощённых газовых месторождениях (ГМ), а оставшуюся долю из общего баланса составляют подземные резервуары, сооружённые в водоносных структурах [Гасумов, Гасумов, 2023; Fyk, Donsky, 2019; Мендебаев и др., 2021; Хан и др., 2015].

С использованием геологической, геофизической, гидродинамической и промысловой информации о строении П-К, с учётом имеющегося у них свойства аккумулировать значительные объёмы газа для регулирования его подачи в соответствии с сезонной неравномерностью газопотребления, был проведён анализ показателей П-К на различных ПХГ. Например, Кушевское ПХГ создано на базе истощенного ГKM, где ФЕС пласта-коллектора значительно хуже, чем на других объектах хранения (пористость – 24–29 %, проницаемость колеблется в диапазоне 19–34,6 мД) [Fyk, Donsky, 2019; Шиповалов и др., 2022; Хан и др., 2015].

По количеству объектов эксплуатации Северо-Ставропольское ПХГ относится к многопластовым (Хадумский горизонт и Зелёная свита) и является самым крупным подземным хранилищем газа в Европе. Ловушкой П-К Хадумского горизонта являются два структурных поднятия платформенного типа, разделенных неглубокой седловиной. Ловушкой для П-К Зеленой свиты является брахиантиклинальная складка субширотного простирания, а отложения в литологическом отношении подразделяются на две части: пласт I (является коллектором газа), представлен песками и алевролитами; пласт 2 сложен песчаниками алевролитистыми, глубина залегания отложений составляет 1000 м.

Большой интерес представляет Касимовское ПХГ, являющееся самым крупным газохранилищем в мире, созданным в водоносном пласте. В структурном плане ловушкой П-К является вытянутая в северо-западном направлении асимметричная складка, имеющая крутое северо-восточное и пологое юго-западное крылья [Хан и др., 2015]. Большинство ПХГ предусматривает циклическую эксплуатацию объекта. При этом возникает необходимость обеспечивать кратковременный максимальный суточный отбор из хранилищ для покрытия повышенных потребностей в газе в связи с резким похолоданием или нарушениями в системе газоснабжения.

Эти факторы должны быть учтены при ТП ПХГ, так как от бесперебойной работы отдельных объектов зависит эффективность работы всей газотранспортной системы. Все эти факторы существенно влияют на параметры П-К и приводят к изменениям призабойной зоны пласта (ПЗП), так как, объект находится в циклическом процессе закачки и отбора газа происходит П-К, обусловленное периодическими деформациями, что отрицательно влияет на режим работы объекта [Brkic et al., 2021; Гарайшин, Кантюков, 2017; Maniuk et al., 2020; Троицкий и др., 2019; Karev, Kovalenko, 2023]. Одной из основных целей проведённых исследований по изучению работы эксплуатируемых ПХГ в различных регионах и ГС, существенно

отличающихся активными и буферными объёмами газа в хранилище, является получение результатов, которые могли бы быть использованы при ТП ПХГ на новых территориях страны. В настоящее время реализуются новые проекты на территории РФ (табл. 2), а в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке намечен большой объем ГРП для поиска структур под создание подземных хранилищ газа и гелиевого концентрата.

Таблица 2 / Table 2

**Проекты по развитию подземных хранилищ газа на территории РФ /
Projects for the development of underground gas storage facilities in the territory
of the Russian Federation**

Подземные хранилища газа / Underground gas storage	Тип ПХГ / Type UGS	Год начала проекта / Year of project start	Проектные характеристики / Design characteristics	
			Объем оперативного резерва газа, млрд м ³ / Volume of operational gas reserve, billion m ³	Максимальная суточная производительность, млн м ³ / Maximum daily productivity, million m ³
Калининградское / Kaliningrad	отложения каменной соли / rock salt deposits	2001	0,26	12
Волгоградское / Volgograd		2011	0,35	25
Беднодемьяновское / Bednodemyanovskoye	водоносные структуры / aquifers	2011	5,0	70,0
Карашурское / Karashurskoye	истощённое месторождение / depleted deposit	1999	1,07	15,2

Установлено, что предшествующие циклы с неравномерными периодами отбора (закачки) газа оказывают влияние на выполнение заданных режимов в последующие годы эксплуатации. В ПХГ, созданных в истощённых ГМ, разрабатываемых ранее при проявлении газового режима, снижение объёма закачиваемого газа приводит к перераспределению давления. В условиях незначительных темпов отбора или закачки, простоя хранилища наблюдается выравнивание давления по объёму залежи [Воробьёв и др., 2014; Гусейнов, 2018]. ПХГ, созданные в водоносных структурах и в истощённых ГМ, приуроченных к активному водонапорному бассейну, эксплуатируются в условиях проявления водонапорного режима. Эксплуатация таких объектов в циклическом режиме обеспечивает минимальные пластовые потери заземлённого газа. Режим циклической эксплуатации сопровождается близкими объёмами внедряемой и оттесняемой пластовой воды в объекте хранения. Проявление водонапорного режима в хранилище создаёт условия, при которых скважины работают при более высоком пластовом давлении в течение всего периода отбора газа. Величина перепада давления между водоносной частью пласта и отдельными зонами газонасыщенной части П-К может иметь разные предельные значения, что может создать условия для продвижения воды в пласт. При гидравлическом разрыве П-К в скважинах ПХГ, расположенных на водоносной структуре, на распределение отборов газа по объекту серьёзное влияние оказывает относительная толщина вскрытия пласта.

Проведённые исследования показывают, что развитие ПХГ требует реализации новых инновационных методов при ТП ПХГ, разработанных в том числе, с учётом результатов изучения опыта эксплуатации действующих подземных резервуаров,

причин возникновения внешних и внутренних факторов, оказывающих влияние на бесперебойность их работы при неравномерном отборе газа. При этом особый интерес представляет изучение вопросов, связанных с разработкой альтернативной технологии эксплуатации ПХГ созданных ГС, в зависимости от значения пластовой энергии, что является одним из инновационных направлений, и должно проводиться для хранилищ с проявлением различных режимов работы залежи (водонапорного или газового) [Воробьев и др., 2014; Сидорчук, Добрынина, 2024; Heinemann et al., 2021].

Как известно этап циклической эксплуатации ПХГ начинается с выхода хранилища на утверждённые проектные показатели и продолжается до её ликвидации, а расчёт режима осуществляется в соответствии с технологической моделью хранилища на планируемый сезон (закачка-отбор газа). Эффективность этапа циклической эксплуатации связана с важными причинами – геологического, технико-технологического и технико-экономического характера, что важно для его оценки (рис. 2 и 3).

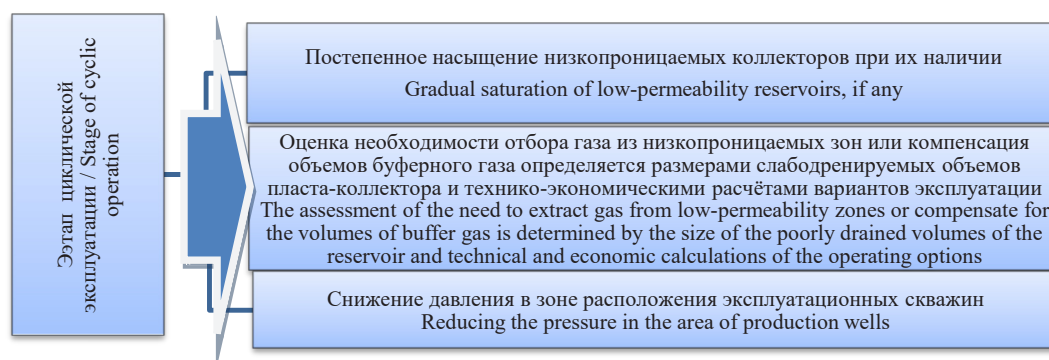


Рис. 2. Показатели этапа циклической эксплуатации подземных хранилищ газа /

Fig. 2. Indicators of the cyclic operation stage of underground gas storage facilities

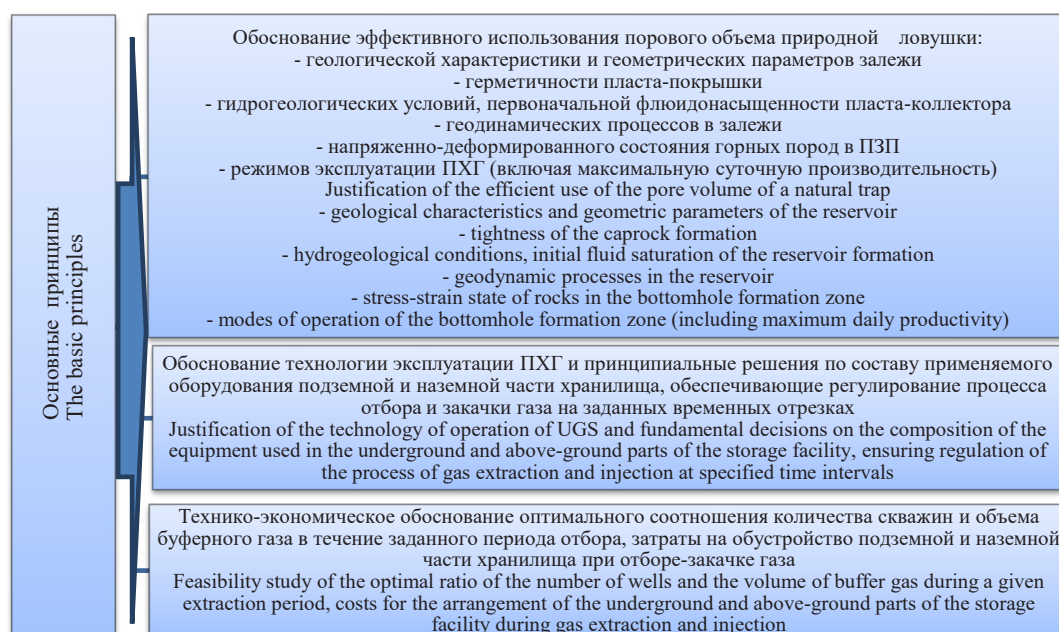


Рис. 3. Основные принципы этапа циклической эксплуатации подземного хранилища /

Fig. 3. Basic principles of the cyclic operation stage of the underground storage facility

Для обеспечения надёжности и герметичности подземного резервуара для хранения газа на выбранном оптимальном варианте эксплуатации ПХГ при неравномерном отборе газа, а также с учётом вышерассмотренных факторов в ТП ПХГ необходимо предусматривать осуществление контроля и мониторинга за состоянием залежи и целого ПХГ, на различных этапах циклической эксплуатации объекта. Возможным инструментом для этого является использование геологической модели ПХГ, которая должна быть учтена в процессе ТП объекта. Геологическая модель, построенная в истощённых ГМ, должна учитывать геологическую, геофизическую, гидродинамическую и промысловую информацию о строении П-К, а также технологические и технико-экономические сведения, накопленные в процессе эксплуатации месторождения. Расчёты по матрице вариантов возможны с привлечением балансовой модели с целью оптимизации процесса выбора приемлемых вариантов эксплуатации ПХГ по пластовой части хранилища, в сравнительном объёмном балансе активного и буферного газа [Шиповалов и др., 2022; Fyk, Donsky, 2019].

В истощённых месторождениях УВ со сложными горно-геологическими условиями при ТП ПХГ должны проводиться уточнения распределения остаточной флюидонасыщенности (пластового флюида) по всей рассматриваемой ГС. В структурах с трещиновато-поровыми породами, при разработке залежи необходимо учитывать её структурно-текстурные особенности, что позволит оптимизировать схемы вскрытия П-К скважинами сложного профиля, обеспечивающими максимальную суточную производительность и исключая избирательное её обводнение, снижение ФЕС пласта-коллектора в процессе эксплуатации ПХГ [Гарайшин, Кантюков, 2017; Хан и др., 2015]. Для обеспечения необходимого объема и периодичности проведения исследований важно создать системы контроля технологических процессов и за герметичностью ПХГ в ГС, где должно быть предусмотрено достаточное количество и расположение наблюдательных скважин на П-К, законтурной зоне (пьезометрические скважины), ниже- и вышележащих контрольных водоносных пластах и приповерхностных отложениях.

В процессе эксплуатации ПХГ происходит увеличение дренируемых объёмов газа, как показала опытная закачка газа в водоносных пластах, в связи чем, следует корректировать комплекс исследований, позволяющих более детально охарактеризовать процессы распределения давления по напластованию и вертикали, обводнения залежи и скважин. Необходимо применять инновационные методы изучения с направленностью и частотой проведения для конкретных геологических условий в зависимости от геометрических, горно-геологических параметров залежи, направленности движения пластовых вод. Рассматриваемые факторы важны для качественного ТП ПХГ, где особое значение имеет наличие полноты и достоверности исходных данных (рис. 4).

Результаты исследования ФЕС пласта по площади и разрезу, активности водонапорной системы и направленности продвижения пластовых вод с учётом расположения поверхностных природных и инфраструктурных объектов позволяет выбрать рациональные схемы размещения эксплуатационных скважин на ПХГ [Gasumov et al., 2020; Гасумов, Гасумов, 2023; Гарайшин, Кантюков, 2017]. Расчёт интерференции (взаимовлияния) скважин и обоснование плотности размещения эксплуатационного фонда при размещении их в предоставляемом горном отводе позволяет прогнозировать гидрогеодинамические связи между объектами, так как,

выбор схемы вскрытия П-К обеспечивает максимально допустимый охват дренирования газонасыщенного порового объёма с учётом резерва скважин.

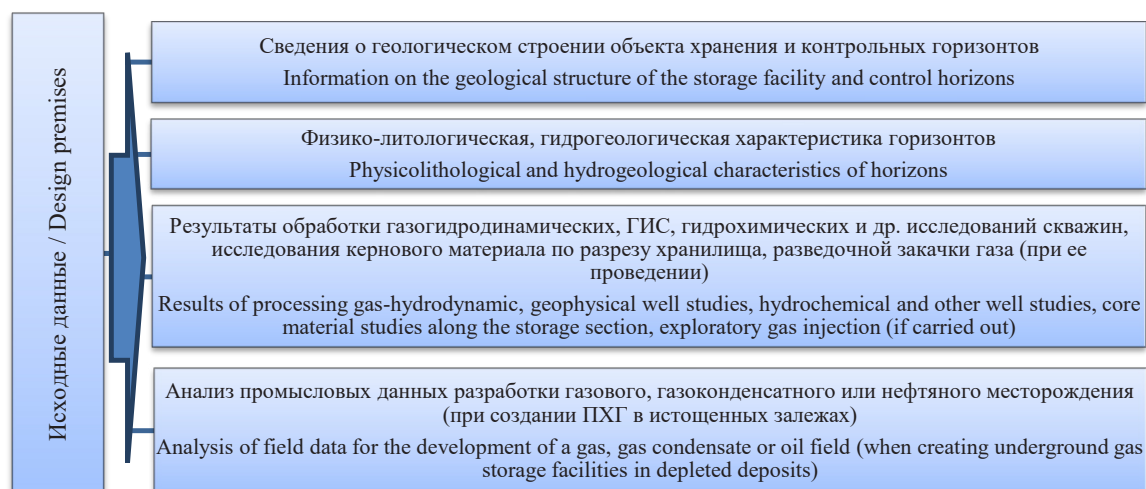


Рис. 4. Необходимые данные для проектирования подземного хранилища /
Fig. 4. Necessary data for designing an underground storage facility

С целью повышения технологической эффективности и рентабельности эксплуатации отдельных П-К за счёт сокращения фонда скважин комбинированный вариант эксплуатации ГС является оправданным, это важно и в том случае, когда многопластовая залежь выделена как эксплуатационный объект [Gasumov et al., 2020; Гасумов, Гасумов, 2023; Гарайшин, Кантюков, 2017]. Для эксплуатационных скважин ПХГ, работающих в циклическом режиме, конструкция их забоя постоянно находится под напряжением в системе «скважина-пласт-скважина», вследствие процесса «закачка-отбор». В связи с чем конструкции забоя скважин при ТП ПХГ уделяется особое внимание.

Научно обоснованный выбор конструкции скважин, в том числе её забоя при ТП ПХГ с использованием горно-геологической и промысловой информации о строении П-К, и результаты изучения опыта по сооружению подземных резервуаров с аналогичными характеристиками, с учётом возможных свойств аккумуляции значительных объёмов газа и необходимых действий в процессе закачки-отбора газа в ГС, обеспечивают эффективную, надёжную и долговечную работу объекта, являющегося сложным подземным инженерным сооружением. Правильный выбор конструкции скважин, также является важным фактором обеспечения герметичности ПХГ в ГС, и минимизации выбросов метана в атмосферу. А также при выборе конструкции забоя скважины необходимо учитывать, что, принимая за основу промысловую практику, при недостаточном отборе всего активного объёма газа за 3–5 сезонов возникают угрозы выхода газа за замыкающую изогипсу, и вследствие отбора газа в последующие сезоны происходит в другом диапазоне давлений и объёмов, с учётом закаченного в новом сезоне, что особенно характерно для ПХГ с активным водонапорным режимом. Данное обстоятельство должно быть учтено при ТП ПХГ и выборе режима его эксплуатации. Установлено, что изменение термобарических условий при выработке залежи приводит к выпадению конденсата нефти, образованию гидратов, залповому росту водного фактора, наличию агрессивных компонентов в составе флюида, изменению положения и формы ГВК при разных

темпах закачки, как на этапе формирования искусственной газовой залежи, так и при выводе на циклическую эксплуатацию [Шиповалов и др., 2022].

Для оптимизации схемы вскрытия П-К в скважинах ПХГ со сложным профилем, что особенно важно в пластах с трещиновато-поровыми коллекторами, наличие информации о структурно-текстурных особенностях пород-коллектора позволяет обеспечить максимальную суточную производительность и исключить избирательное обводнение скважин по отдельным проницаемым каналам, снижение ФЕС в процессе ее эксплуатации.

Исследования информации о строении аккумулирующей залежи, оценку максимального газонасыщенного порового объёма и характера изменения ФЕС П-К при ТП ПХГ, рекомендуется осуществлять с использованием геологической модели залежи, что важно для выбора режима оптимальной и безопасной эксплуатации объекта в многофункциональных промысловых условиях. Для ТП ПХГ геологическая модель, построенная в истощённых месторождениях, должна учитывать геологическую, геофизическую, гидродинамическую и промысловую информацию о строении пласта-коллектора, а также технологические и технико-экономические сведения, накопленные в процессе эксплуатации месторождения. А на перспективной площади, в водоносных пластах в исходной информации используются данные ГРП, с постоянной адаптацией при получении новых геологических данных [Гусейнов, 2018; Хан и др., 2015; Matos et al., 2019].

Если геологические аспекты при ТП ПХГ позволяют правильно выбрать П-К (хранилище), то ТЭО решает ряд других задач, в том числе возможность оценить уровень капвложений по рассматриваемым вариантам; оценить уровень затрат на эксплуатацию с учётом особенностей реализации рассматриваемых вариантов; технико-экономическое сравнение рассматриваемых вариантов и рекомендация наиболее предпочтительного. При ТЭО буферный газ рассматривается как капитальное вложение на обустройство подземной части хранилища, а поставки газа учитываются по годам. Суточная производительность хранилища зависит не только от общего количества газа в пласте, но и от наземного обустройства, пропускной способности линейной части, оборудования по подготовке газа, мощности газоперекачивающего агрегата [Поварова и др., 2022; Михайловский, Лобанова, 2023].

Заключение

Большинство созданных ПХГ на территории России приурочено к складчатым ловушкам, где коллекторы сложены терригенными и карбонатными породами. При ТП ПХГ обязательным условием является герметичность объекта, которая может быть обеспечена при наличии в геологической структуре комплекса непроницаемых пород (покрышек), позволяющих исключить вертикальную миграцию газа из П-К. Наличие в ГС контрольных горизонтов над продуктивной толщей, достаточное количество фонда контрольных скважин и их оптимальное расположение по площади ПХГ, позволяет оценивать и прогнозировать возможные межпластовые перетоки и образование техногенных залежей. Проблемы, связанные с герметичностью покрышек над продуктивной толщей, являются препятствующим фактором при строительстве ПХГ в водоносных структурах с требуемым объемом активного газа.

Установлено, что при циклической работе (закачка и отбор) ПХГ создаётся серьёзная нагрузка в ПЗП, которая приводит к изменению ФЕС и разрушению П-К. Эксплуатация ПХГ, созданных в истощённых газовых месторождениях и водонос-

ных структурах и приуроченных к активному водонапорному бассейну, эксплуатируемых в циклическом режиме и в условиях водонапорного режима, обеспечивает минимальные пластовые потери заземлённого газа. Оптимизация процесса выбора приемлемых вариантов эксплуатации ПХГ по пластовой части хранилища, предусматривающих разное соотношение объёмов активного и буферного газа, возможна на основе расчёта по матрице вариантов с привлечением балансовой модели, что имеет практическую значимость и может быть использовано при ТП ПХГ в ГС.

Литература

1. Воробьёв А.Е., Малюков В.П., Иванова А.И. Инновационная ресурсопроизводящая технология использования подземных хранилищ. // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2014. – № 1. – С. 117–131.
2. Гарайшин А.С., Кантюков Р.Р. Выбор пласта-коллектора для захоронения промышленных стоков Арбузовского. // Георесурсы. – 2017. – Т. 19. № 1. – С. 82–86.
3. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Оценка гидродинамического совершенства системы скважина-пласт, формируемой на этапе вскрытия продуктивного пласта. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 108–123.
4. Гусейнов Т.Н. Характерные проблемы адаптации гидродинамических моделей нефтяных месторождений к истории разработки и возможные пути решения. // Молодёжный научный вестник. – 2018. – Т. 37. № 12. – С. 13–19.
5. Мендебаев Т.Н., Третьяк А.Я., Смашов Н.Ж., Мохов А.В., Бурцев А.А. Освоение месторождений подземных вод инжекторно-принудительным способом. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 160–171.
6. Михайловский А.А., Лобанова А.Н. Состояние и актуальные направления технологического развития системы ПХГ ПАО «Газпром». // Научный журнал Российского газового общества. – 2023. – Т. 38. № 2. – С. 6–13.
7. Поварова Л.В., Самарин М.А., Соловьёв М.Д., Саввон Я.В. Оценка экологической опасности при разработке Южно-Черноерковского месторождения. // Булатовские чтения. – 2022. – Т. 2. – С. 117–120.
8. Пономарев О.П. Геоэкологические особенности эксплуатации подземных хранилищ природного газа. // Вестник РГУ им. И. Канта. – 2016. – Вып. 1. – С. 69–77.
9. Сидорчук Е.А., Добрынина С.А. Геодинамическая природа размещения нефтегазовых месторождений (на примере территории Ставропольского края). // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 179–194.
10. Троицкий В.М., Григорьев Б.А., Рассохин С.Г., Соколов А.Ф., Мизин А.В., Ваньков В.П. Физическое моделирование циклов закачки и отбора газа при разработке и эксплуатации ПХГ. Гистерезис фазовых проницаемостей. // Вести газовой науки. – 2019. – Т. 38. № 1. – С. 18–28.
11. Хан С.А., Костиков С.Л., Сеиенов О.Г., Акчурин И.Д. Разработка и внедрение эффективных технологий при создании эксплуатации Касимовского ПХГ. // Газовая промышленность. – 2015. – Т. 718. № 2. – С. 83–88.
12. Шиповалов А.Н., Земенков Ю.Д., Торопов С.Ю., Подорожников С.Ю., Земенкова М.Ю., Тырылгин И.В., Павлов В.П. Аспекты технологической надёжности и экономической хранилищ природного газа Западной Сибири. Тюмень: ТИУ, 2022. – 344 с.
13. Alani O.K., Okechukwu C.A. Analysis of geological and technical condition for creation of underground gas storage in a depleted gas reservoir of Yuzhno-Lugovskoye field in Russia. // Petroleum and Coal. – 2019. – Vol. 61. No. 1. – pp. 10–20.
14. Brkic V., Zelenika I., Mijic P., Medved I. Underground gas storage process optimisation with respect to reservoir parameters and production equipment. // Energies. – 2021. – Vol. 20. No. 14. – Art. No. 4324. DOI: 10.3390/en14144324.

15. Ermolaev A., Latipov A., et al. Optimal well placement model for underground gas storages. // In: Proceedings 15 International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Moscow, 26-28 September 2022. – 2022. pp. 1–4. DOI: 10.1109/MLSD55143.2022.9934383.
16. Fyk M.I., Donsky D. Fundamentals of technology R & D design and operation of oil and gas underground storage. National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2019. –164 p.
17. Gasumov R.A., Gasumov E.R., Minchenko J.S. Features of the underground storages construction in depleted oil and gas condensate fields. // Notes of the Mining Institute. – 2020. – Vol. 244. – pp. 418–427.
18. Heinemann N., Alcalde J., Miocic J.M., et al. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – The scientific challenges. // Energy Environmental Science. – 2021. – No. 14. – pp. 853–864. DOI: 10.1039/D0EE03536J.
19. Maniuk V.M., Dubei N.V., Mykhailiv I.R., Boiko A.P. On the study of geological characteristics of underground gas storage objects. // In: Proceedings of the European Association of Geoscientists & Engineers Source: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020. – 2020. – Vol. 2020. – pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2020geo145.
20. Matos C.R., Carneiro J.F., Silva P.P. Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification. // Journal of Energy Storage. – 2019. – Vol. 21. – pp. 241–258. DOI: 10.1016/j.est.2018.11.023.
21. Mu L., Liao X., Yu Q. et al. Study on operation strategy of aquifer underground gas storage using CO₂ as cushion gas. // In: Proceedings of the Carbon Management Technology Conference, Houston, TX, USA, 15–18 July 2019. DOI: 10.7122/CMTC-552947-MS.
22. Karev V., Kovalenko Y. Geomechanical modelling of the stress-strain state in UGS reservoirs during cyclic changes in reservoir pressure and downhole pressure. // Geomechanical Aspects of Operation of Underground Gas Storage. – 2023. – pp. 37–67.
23. Uliasz-Misiak B., Misiak J. Underground gas storage in saline aquifers: geological aspects. // Energies. – 2024. – Vol. 17. No. 7. – Art. No. 1666. DOI: 10.3390/en17071666.

References

1. Vorobyov A.E., Malyukov V.P., Ivanova A.I. Innovative resource-reproducing technology for using underground storage facilities. Vestnik of RUDN. Series: Engineering Research. 2014. No. 1. pp. 117–131. (In Russ.)
2. Garayshin A.S., Kantyukov R.R. Selection of a reservoir for the disposal of industrial wastewater from Arbuzovsky. Georesources. 2017. Vol. 19. No. 1. pp. 82–86. (In Russ.)
3. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Assessment of the hydrodynamic perfection of the well-formation system formed at the stage of opening the productive formation. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 108–123. (In Russ.)
4. Guseinov T.N. Characteristic problems of adaptation of hydrodynamic models of oil fields to the history of development and possible solutions. Youth Scientific Bulletin. 2018. Vol. 37. No. 12. pp. 13–19. (In Russ.)
5. Mendebaev T.N., Tretyak A.Ya., Smashov N.Zh., Mokhov A.V., Burtsev A.A. Development of groundwater deposits by the forced-injection method. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 160–171. (In Russ.)
6. Mikhailovsky A.A., Lobanova A.N. Status and current directions of technological development of the UGS system of PJSC Gazprom. Scientific Journal of the Russian Gas Society. 2023. Vol. 38. No. 2. pp. 6–13. (In Russ.)
7. Povarova L.V., Samarin M.A., Soloviev M.D., Savvon Ya.V. Assessment of the environmental hazard during the development of the Yuzhno-Chernoyerkovskoye field. Bulatovskie Readings. 2022. Vol. 2. pp. 117–120. (In Russ.)

8. Ponomarev O.P. Geoecological features of operation of underground natural gas storage facilities. *Bulletin of the Russian State University named after I. Kant*. 2016. Issue 1. pp. 69–77. (In Russ.)
9. Sidorchuk E.A., Dobrynina S.A. Geodynamic nature of oil and gas field placement (using the Stavropol Territory as an example). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 179–194. (In Russ.)
10. Troitsky V.M., Grigoriev B.A., Rassokhin S.G., Sokolov A.F., Mizin A.V., Vankov V.P. Physical modeling of gas injection and withdrawal cycles during development and operation of UGS. Hysteresis of phase permeabilities. *Vesti gazovoy nauki*. 2019. Vol. 38. No. 1. pp. 18–28. (In Russ.)
11. Khan S.A., Kostikov S.L., Seienov O.G., Akchurin I.D. Development and implementation of effective technologies in the creation and operation of the Kasimovskoye UGS facility. *Gas industry*. 2015. Vol. 718. No. 2. pp. 83–88. (In Russ.)
12. Shipovalov A.N., Zemenkov Yu.D., Toropov S.Yu., Podorozhnikov S.Yu., Zemenkova M.Yu., Tyrylgina I.V., Pavlov V.P. Aspects of technological reliability and economics of natural gas storage facilities in Western Siberia. Tyumen. Tyumen Industrial University. 2022. 344 p. (In Russ.)
13. Alani O.K., Okechukwu C.A. Analysis of geological and technical condition for creation of underground gas storage in a depleted gas reservoir of Yuzhno-Lugovskoye field in Russia. *Petroleum and Coal*. 2019. Vol. 61. No. 1. pp. 10–20.
14. Brkic V., Zelenika I., Mijic P., Medved I. Underground gas storage process optimisation with respect to reservoir parameters and production equipment. *Energies*. 2021. Vol. 20. No. 14. Art. No. 4324. DOI: 10.3390/en14144324.
15. Ermolaev A., Latipov A., et al. Optimal well placement model for underground gas storages. In: *Proceedings 15 International Conference Management of large-scale system development (MLSD)*. Moscow. 26–28 September 2022. 2022. pp. 1–4. DOI: 10.1109/MLSD55143.2022.9934383.
16. Fyk M.I., Donsky D. Fundamentals of technology R & D design and operation of oil and gas underground storage. National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. 2019. 164 p.
17. Gasumov R.A., Gasumov E.R., Minchenko J.S. Features of the underground storages construction in depleted oil and gas condensate fields. *Notes of the Mining Institute*. 2020. Vol. 244. pp. 418–427.
18. Heinemann N., Alcalde J., Miocic J.M., et al. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – The scientific challenges. *Energy Environmental Science*. 2021. No. 14. p. 853–864. DOI: 10.1039/D0EE03536J.
19. Maniuk V.M., Dubei N.V., Mykhailiv I.R., Boiko A.P. On the study of geological characteristics of underground gas storage objects. In: *Proceedings of the European Association of Geoscientists & Engineers Source: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020*. 2020. Vol. 2020. pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2020geo145.
20. Matos C.R., Carneiro J.F., Silva P.P. Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification. *Journal of Energy Storage*. 2019. Vol. 21. pp. 241–258. DOI: 10.1016/j.est.2018.11.023.
21. Mu L., Liao X., Yu Q. et al. Study on operation strategy of aquifer underground gas storage using CO₂ as cushion gas. In: *Proceedings of the Carbon Management Technology Conference*, Houston. TX. USA. 15–18 July 2019. DOI: 10.7122/CMTC-552947-MS.
22. Karev V., Kovalenko Y. Geomechanical modelling of the stress-strain state in UGS reservoirs during cyclic changes in reservoir pressure and downhole pressure. *Geomechanical Aspects of Operation of Underground Gas Storage*. 2023. pp. 37–67.
23. Uliasz-Misiak B., Misiak J. Underground gas storage in saline aquifers: geological aspects. *Energies*. 2024. Vol. 17. No. 7. Art. No. 1666. DOI: 10.3390/en17071666.