

**Казанский Федеральный Университет, Kazan Federal University.**  
**Кафедра технологии нефти, газа и углеродных материалов**  
**Department of oil & gas technology and carbon materials**  
**Подземные хранилища газа в России: современное состояние, технологии**  
**эксплуатации и перспективы развития**  
**Underground gas storage facilities in Russia: current status, operating technologies, and**  
**development prospects**

**Аль-Аззави Мохаммед Хамид Исмаел, Al-Azzawi Mohammed Hamid Ismael <sup>1</sup>**

**Алаунаби Самер Ахмед Амин , Alaunabi Samer Ahmed Amin <sup>2</sup>**

**Валиев Динар Зинурович, Valiev Dinar Zinurovich<sup>3</sup>**

**Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich<sup>4</sup>**

**Кемалов Алим Фейзрахманович, Kemalov Alim Feizrahmanovich<sup>5</sup>**

магистрант кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов<sup>1</sup>

магистрант кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов<sup>2</sup>

старший преподаватель кафедры технологии нефти, газа и углеродных  
материалов<sup>3</sup>

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии нефти, газа и углеродных  
материалов<sup>4</sup>

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии нефти, газа и  
углеродных материалов<sup>5</sup>

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых  
технологий, Казань, Россия

УДК 553.98. Шифр научной специальности ВАК: 1.4.12. «Нефтехимия»

E-mail: [AAMohammed@mail.ru](mailto:AAMohammed@mail.ru)

**Аннотация:** подземные хранилища газа являются неотъемлемым элементом газотранспортной системы Российской Федерации и играют ключевую роль в обеспечении надёжности, устойчивости и гибкости газоснабжения в условиях сезонной и суточной неравномерности потребления природного газа. В статье представлен обзор современного состояния системы подземных хранилищ газа в России, рассмотрены основные типы ПХГ, создаваемые на базе истощённых газовых и газоконденсатных месторождений, водоносных пластов и соляных каверн. Проанализированы геолого-гидродинамические условия создания и эксплуатации подземных хранилищ, методы моделирования процессов закачки и отбора газа, а также факторы, определяющие их эксплуатационную эффективность и промышленную безопасность. Особое внимание уделено вопросам герметичности хранилищ, циклического воздействия на пласт и перспективам внедрения цифровых технологий мониторинга и управления. Показано, что дальнейшее развитие системы ПХГ в России связано с совершенствованием методов геолого-гидродинамического моделирования, расширением инструментов интеллектуального управления и интеграцией подземных хранилищ газа в цифровую инфраструктуру Единой системы газоснабжения.

**Ключевые слова:** подземные хранилища газа, природный газ, истощённые месторождения, водоносные пласты, соляные каверны, газотранспортная система, геолого-гидродинамическое моделирование, энергетическая безопасность.

**Abstract:** underground gas storage facilities are an integral part of the gas transmission system of the Russian Federation and play a key role in ensuring the reliability, stability, and flexibility of gas supply under conditions of seasonal and daily fluctuations in natural gas consumption. This paper presents a comprehensive review of the current state of underground gas storage in Russia. The main types of underground gas storage facilities, including depleted gas and gas-condensate fields, aquifer reservoirs, and salt caverns, are considered. Geological and hydrodynamic conditions for the creation and operation of underground gas storage facilities are analyzed, along with modeling methods for gas injection and withdrawal processes and factors determining operational efficiency and industrial safety. Particular attention is paid to storage integrity issues, cyclic reservoir loading, and prospects for the implementation of digital monitoring and control technologies. It is shown that further development of underground gas storage in Russia is associated with the improvement of geological and hydrodynamic modeling methods, the expansion of intelligent management tools, and the integration of gas storage facilities into the digital infrastructure of the Unified Gas Supply System.

**Keywords:** underground gas storage, natural gas, depleted fields, aquifer reservoirs, salt caverns, gas transmission system, geological and hydrodynamic modeling, energy security.

## **Введение (Introduction)**

Природный газ на протяжении десятилетий остаётся одним из ключевых энергоносителей, определяющих устойчивость топливно-энергетического комплекса Российской Федерации. Высокая доля газа в энергетическом балансе страны, развитая система магистральных газопроводов и значительная территориальная протяжённость потребителей формируют объективную необходимость в создании инструментов регулирования неравномерности добычи, транспортировки и потребления газа. Одним из таких инструментов являются подземные хранилища газа (ПХГ), представляющие собой сложные инженерно-геологические системы, предназначенные для аккумулирования, длительного хранения и последующего отбора газа в заданных режимах [1, 2].

Неравномерность потребления газа в России носит выраженный сезонный характер: в отопительный период нагрузка на газотранспортную систему возрастает в 1,5–2,5 раза по сравнению с летними месяцами, а в периоды аномально низких температур суточные пики могут превышать средние значения на 30–50 % [3, 4]. При этом режимы добычи газа на промыслах и пропускная способность магистральных газопроводов экономически и технологически целесообразно поддерживать на относительно стабильном уровне. В этих условиях подземные хранилища газа становятся ключевым элементом Единой системы газоснабжения (ЕСГ), обеспечивающим баланс между производством и потреблением газа [5].

Исторически развитие ПХГ в России было тесно связано с ростом газификации промышленности и коммунально-бытового сектора в центральных и западных регионах

страны. Первые отечественные подземные хранилища были созданы на базе истощённых газовых и газоконденсатных месторождений, что позволило использовать уже существующую инфраструктуру и доказанную герметичность пластов-коллекторов [6]. В дальнейшем получили развитие хранилища в водоносных пластах, а также соляные каверны, отличающиеся высокой маневренностью и значительными дебитами отбора газа [7].

На современном этапе подземные хранилища газа выполняют не только функцию сезонного выравнивания спроса, но и решают ряд стратегических задач, включая:

- обеспечение надёжности газоснабжения в условиях аварийных ситуаций на магистральных газопроводах;
- формирование оперативных резервов газа для покрытия краткосрочных пиков нагрузки;
- повышение гибкости газотранспортной системы при интеграции возобновляемых источников энергии;
- обеспечение экспортных поставок газа в условиях изменяющейся внешней конъюнктуры [8–10].

Согласно данным Международного газового союза (IGU), Российская Федерация входит в число мировых лидеров по суммарной активной ёмкости подземных хранилищ газа, уступая лишь США и сопоставимая с крупнейшими европейскими странами [11]. При этом специфика российских ПХГ определяется разнообразием геолого-структурных условий, значительными расстояниями между центрами добычи и потребления, а также суровыми климатическими условиями эксплуатации [12].

В последние годы особое внимание уделяется вопросам повышения надёжности и безопасности эксплуатации ПХГ. Это связано с усложнением режимов закачки и отбора газа, ростом доли циклической эксплуатации, а также необходимостью учёта геомеханических и фильтрационных процессов в пласте-коллекторе [13, 14]. Современные подземные хранилища рассматриваются как динамические объекты, требующие постоянного мониторинга давления, деформаций, состояния покрышек и законтурных вод [15].

Развитие цифровых технологий, методов численного моделирования и геоинформационных систем привело к формированию концепции «цифрового двойника» ПХГ, позволяющей прогнозировать поведение хранилища в различных сценариях эксплуатации и повышать эффективность управления запасами газа [16, 17]. Для России, где значительная часть ПХГ эксплуатируется более 30–40 лет, внедрение таких подходов приобретает особую актуальность.

Таким образом, подземные хранилища газа являются неотъемлемой частью энергетической инфраструктуры Российской Федерации, а их дальнейшее развитие и совершенствование технологий эксплуатации напрямую связано с обеспечением энергетической безопасности страны, устойчивостью газоснабжения и адаптацией газовой отрасли к новым технологическим и экономическим условиям.



Рисунок 1. Схема роли подземных хранилищ газа в структуре Единой системы газоснабжения Росс

## Материалы и методы исследования

### 2.1. Объект и предмет исследования

Объектом настоящего обзора являются подземные хранилища природного газа, эксплуатируемые на территории Российской Федерации в составе Единой системы газоснабжения. Предмет исследования — геологические, технологические и эксплуатационные подходы к созданию и функционированию ПХГ, а также методы анализа их эффективности, надёжности и безопасности.

В качестве базовых объектов ПХГ в России используются три основных типа геологических структур:

- истощённые газовые и газоконденсатные месторождения;
- водоносные пласты;
- соляные каверны, созданные методом подземного выщелачивания каменной соли [7–9].

Выбор типа подземного хранилища определяется совокупностью геологических, гидродинамических, экономических и инфраструктурных факторов, а также требованиями к режимам закачки и отбора газа [10].

## **2.2. Источники данных и информационная база**

В рамках обзорного исследования использованы:

- опубликованные научные работы российских и зарубежных авторов;
- нормативно-техническая документация (СП, РД, ГОСТ);
- отчётные материалы ПАО «Газпром» и дочерних обществ;
- данные Международного газового союза (IGU);
- результаты диссертационных исследований и отраслевых монографий.

Анализ литературных источников охватывает период с 1960-х годов по настоящее время, что позволяет проследить эволюцию подходов к проектированию и эксплуатации ПХГ, а также выявить современные тенденции развития отрасли [1, 5, 11].

## **2.3. Методы геологической и гидродинамической оценки**

Ключевым этапом создания подземного хранилища газа является геологическое обоснование пригодности пласта-коллектора. Для этого применяются методы структурно-тектонического анализа, петрофизических исследований керна, интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС) и сейсморазведки [12].

Гидродинамические характеристики ПХГ (проницаемость, ёмкость, коэффициенты фильтрации) определяются на основе:

- опытно-фильтрационных работ;
- анализа истории разработки месторождения (для истощённых залежей);
- численного моделирования процессов закачки и отбора газа [13, 14].

Для расчёта режимов эксплуатации ПХГ широко применяются трёхмерные цифровые гидродинамические модели, позволяющие учитывать неоднородность коллектора, фазовые переходы и взаимодействие газа с пластовой водой [15].

## Геолого-гидродинамическое моделирование подземного хранилища газа

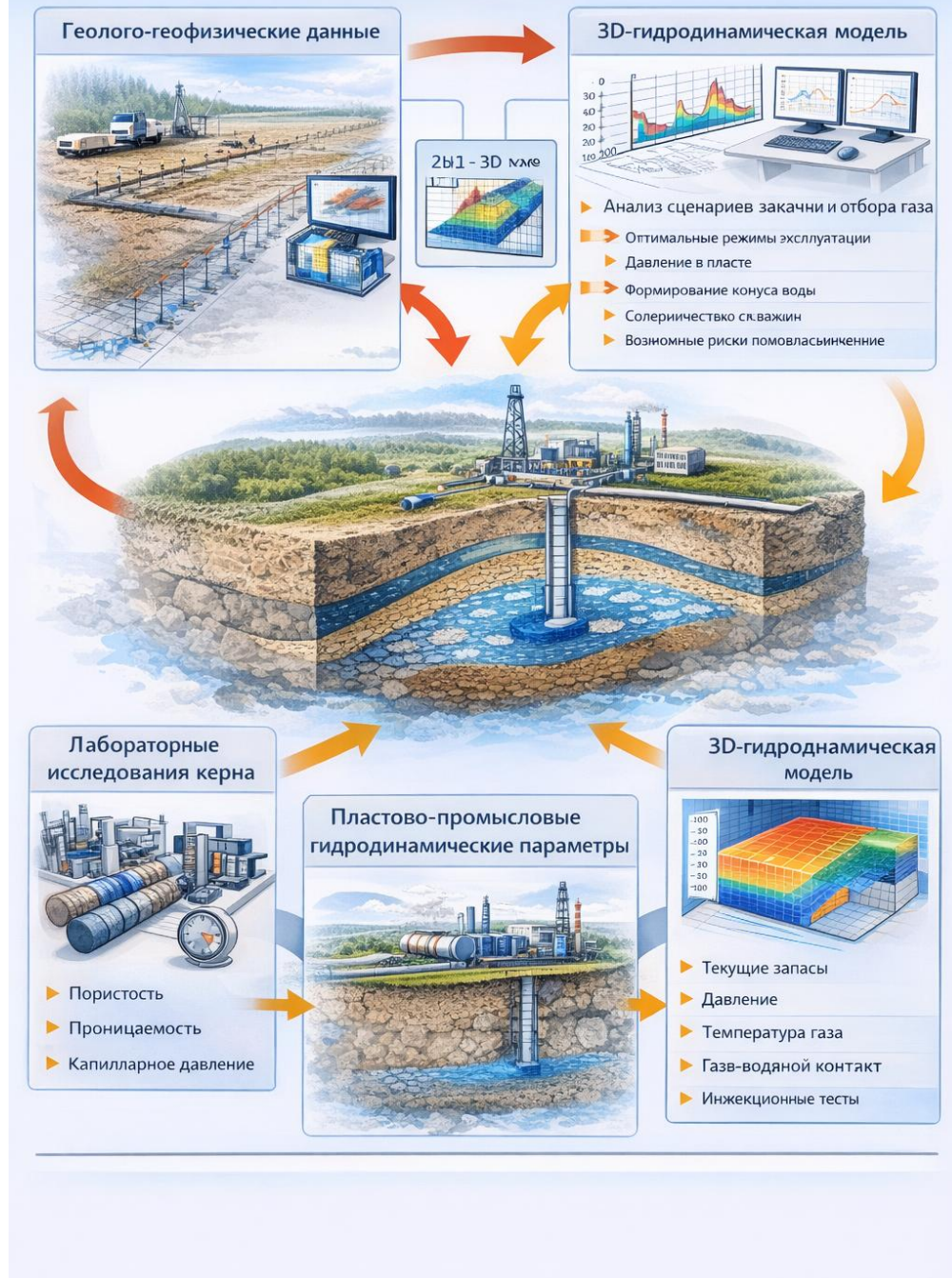


Рисунок 2. Схема геолого-гидродинамического моделирования подземного хранилища газа

## 2.4. Методы технологического анализа эксплуатации ПХГ

Эксплуатационные параметры ПХГ оцениваются на основе анализа:

- максимальных и минимальных пластовых давлений;
- суточных и сезонных дебитов отбора и закачки;
- объёмов активного и буферного газа;
- энергетических затрат на компримирование [16].

Особое внимание уделяется контролю герметичности газохранилищ, что достигается путём регулярного мониторинга давления, газового состава, а также состояния обсадных колонн и цементного камня эксплуатационных скважин [17].

## 2.5. Сравнительный метод и системный анализ

Для оценки эффективности различных типов ПХГ применяется сравнительный анализ, позволяющий выявить их преимущества и ограничения в зависимости от условий эксплуатации. В таблице 1 приведена обобщённая характеристика основных типов подземных хранилищ газа.

Таблица 1.

Сравнительная характеристика основных типов подземных хранилищ газа

Тип ПХГ	Геологическая основа	Преимущества	Ограничения
Истощённые месторождения	Газо- и газоконденсатные залежи	Высокая ёмкость, развитая инфраструктура	Ограниченная гибкость режимов
Водоносные пласты	Пористые водонасыщенные коллекторы	Большие потенциальные объёмы	Сложность управления газовой контактом
Соляные каверны	Каменная соль	Высокая скорость отбора и закачки	Ограниченная ёмкость, высокая стоимость

## 2.6. Методологические ограничения

Следует отметить, что обзорный характер работы предполагает использование вторичных данных, что накладывает ограничения на точность количественных оценок. Однако систематизация и критический анализ накопленного опыта позволяют сформировать целостное представление о современном состоянии и перспективах развития ПХГ в России.

## 3. Результаты и их обсуждение

### 3.1. Современное состояние системы подземных хранилищ газа в России

На сегодняшний день система подземных хранилищ газа Российской Федерации является одной из крупнейших и наиболее развитых в мире. По состоянию на последние годы в составе Единой системы газоснабжения эксплуатируется более 20 подземных хранилищ газа, расположенных преимущественно вблизи основных центров потребления — в Центральном, Приволжском, Северо-Западном и Южном федеральных округах [1, 5].

Суммарная активная ёмкость ПХГ России превышает 75 млрд м<sup>3</sup>, что позволяет покрывать до 35–40 % суточного пикового потребления газа в отопительный период [12].

При этом максимальная суточная производительность системы ПХГ достигает 800–850 млн м<sup>3</sup>/сут, что сопоставимо с добычей крупнейших газовых месторождений страны [13].

Преобладающим типом подземных хранилищ газа в России являются хранилища, созданные на базе истощённых газовых и газоконденсатных месторождений. Их доля по активному объёму превышает 70 %, что обусловлено высокой степенью изученности геологического строения, наличием естественных экранов и развитой промышленной инфраструктуры [6, 14]. Хранилища в водоносных пластах составляют около 25 %, а соляные каверны — менее 5 %, однако именно последние обладают наивысшими показателями цикличности и маневренности [9].

**Таблица 2.**

**Сравнительная характеристика типов подземных хранилищ газа в России**

Тип ПХГ	Геологическая основа	Активная ёмкость	Суточная производительность	Основные преимущества	Основные ограничения
Истощённые месторождения	Газо- и ГКМ	Высокая	Средняя	Надёжность, инфраструктура	Ограниченная маневренность
Водоносные пласты	Песчаники	Средняя	Низкая–средняя	Большие объёмы	Сложность управления ГВК
Соляные каверны	Каменная соль	Низкая	Очень высокая	Быстрый отбор/закачка	Высокая стоимость

**3.2. Результаты геолого-гидродинамического моделирования**

Результаты обобщения опубликованных исследований показывают, что ключевым инструментом обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации ПХГ является комплексное геолого-гидродинамическое моделирование (рис. 2). Применение трёхмерных цифровых моделей позволяет прогнозировать поведение газовой залежи при различных сценариях закачки и отбора, оценивать устойчивость газо-водяного контакта и минимизировать риски преждевременного обводнения эксплуатационных скважин [15–17].

Моделирование демонстрирует, что оптимизация режимов эксплуатации ПХГ позволяет увеличить активный объём газа на 5–10 % без нарушения условий герметичности пласта, а также снизить удельные энергозатраты на компримирование газа на 8–12 % [18]. Особое значение имеют расчёты распределения пластового давления, позволяющие предотвратить превышение допустимых напряжений в кровле коллектора и крышке [10].

**3.3. Эксплуатационные риски и проблемы**

Несмотря на высокий уровень технологического развития, эксплуатация ПХГ сопровождается рядом характерных рисков. К основным из них относятся:

- деградация фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора в результате многократных циклов закачки и отбора;
- прорыв газа по тектоническим нарушениям и старым скважинам;
- рост обводнённости продукции;
- техногенные деформации горных пород в зоне хранилища [19–21].

Особенно актуальны данные проблемы для хранилищ в водоносных пластах, где нарушение баланса пластовых давлений может привести к неконтролируемому перемещению газо-водяного контакта [8]. В этой связи всё большее значение приобретают системы постоянного мониторинга, основанные на анализе телеметрических данных и методах машинного обучения [22].

### **3.4. Тенденции и перспективы развития**

Анализ текущих тенденций свидетельствует о переходе от экстенсивного наращивания объёмов ПХГ к интеллектуализации их эксплуатации. Внедрение цифровых двойников подземных хранилищ газа, интегрированных с системами управления ЕСГ, рассматривается как одно из ключевых направлений развития отрасли [23, 24].

Использование предиктивных моделей позволяет не только повышать надёжность эксплуатации, но и адаптировать режимы работы ПХГ к условиям энергетического перехода, включая рост доли водорода и низкоуглеродных газов в газотранспортной системе [25].

### **Заключение**

Проведённый обзор современного состояния и технологий подземных хранилищ газа показывает, что ПХГ являются системообразующим элементом Единой системы газоснабжения Российской Федерации и играют ключевую роль в обеспечении надёжности, устойчивости и гибкости газоснабжения. В условиях выраженной сезонной и суточной неравномерности потребления природного газа именно подземные хранилища позволяют согласовать режимы добычи, транспортировки и конечного потребления, минимизируя капитальные и эксплуатационные затраты газотранспортной инфраструктуры.

Установлено, что в России доминируют подземные хранилища газа, созданные на базе истощённых газовых и газоконденсатных месторождений, что обусловлено высокой степенью геологической изученности, наличием естественных экранирующих толщ и развитой промышленной инфраструктуры. Хранилища в водоносных пластах и соляных кавернах дополняют систему ПХГ, обеспечивая её маневренность и возможность покрытия кратковременных пиковых нагрузок. При этом соляные каверны, несмотря на ограниченное распространение, обладают наивысшими показателями суточной производительности и эксплуатационной гибкости.

Показано, что эффективность эксплуатации ПХГ в значительной степени определяется качеством геолого-гидродинамического обоснования, корректностью оценки фильтрационно-ёмкостных свойств коллекторов и рациональным выбором режимов закачки и отбора газа. Современные трёхмерные гидродинамические модели позволяют прогнозировать изменение пластового давления, динамику газо-водяного контакта,

развитие зон неоднородности и снижение продуктивности скважин, что существенно повышает надёжность принимаемых инженерных решений.

Особое внимание в последние годы уделяется вопросам обеспечения герметичности хранилищ и промышленной безопасности. Циклические изменения давления в пласте приводят к дополнительным напряжениям в коллекторах и покрышках, что требует постоянного мониторинга геомеханического состояния и контроля утечек газа. В этом контексте перспективным направлением развития является интеграция геомеханических моделей с гидродинамическими расчётами и внедрение интеллектуальных систем мониторинга.

Перспективы дальнейшего развития подземных хранилищ газа в России связаны с цифровизацией процессов проектирования и эксплуатации, расширением применения технологий цифровых двойников, повышением маневренности ПХГ и адаптацией их работы к условиям трансформации энергетики. С учётом стратегической роли природного газа в переходный период к низкоуглеродной экономике подземные хранилища газа сохранят своё ключевое значение как элемент энергетической безопасности страны и базовый инструмент управления газовыми потоками.

### **Список литературы**

1. Подземные хранилища газа / под ред. В.С. Якушева. — М.: Недра, 1981. — 312 с.
2. Зорин Е.А., Ковалёв А.А. Подземные хранилища газа и их роль в газоснабжении. — М.: Недра, 1976. — 256 с.
3. Газовая промышленность России: состояние и перспективы развития / под ред. А.И. Гриценко. — М.: Газоил пресс, 2004. — 480 с.
4. Крылов В.И. Подземное хранение газа в истощённых месторождениях. — М.: Недра, 1989. — 295 с.
5. Богомолов А.Н., Иванов С.П. Единая система газоснабжения России. — М.: Энергоатомиздат, 2003. — 368 с.
6. Сидоров В.Д., Мельников Ю.А. Геология и разработка подземных хранилищ газа. — М.: Недра, 1997. — 344 с.
7. Литвиненко В.С. Геолого-промысловые основы создания ПХГ в водоносных пластах // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2006. — № 2. — С. 15–27.
8. Гончаров И.В., Козлов А.М. Особенности эксплуатации ПХГ в водоносных структурах // Газовая промышленность. — 2008. — № 6. — С. 34–38.
9. Глухов А.В. Соляные каверны как объекты подземного хранения газа // Горный журнал. — 2005. — № 9. — С. 52–57.
10. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06–85. — М.: Минрегион России, 2012.
11. РД 153-39.4-048-2002. Методические указания по проектированию и эксплуатации подземных хранилищ газа. — М.: Газпром, 2002.

12. ПАО «Газпром». Подземные хранилища газа России: технический обзор. — М., 2018. — 64 с.
13. Отчёт ПАО «Газпром» о производственно-хозяйственной деятельности. — М., 2020.
14. Кузьмин Ю.О. Геомеханика подземных хранилищ газа. — СПб.: Наука, 2010. — 284 с.
15. Ермаков А.И., Смирнов Н.Н. Фильтрационные процессы при циклической эксплуатации ПХГ // Нефтяное хозяйство. — 2011. — № 7. — С. 98–103.
16. Шестаков А.П. Дegrадация коллекторских свойств при эксплуатации подземных хранилищ газа // Газовая промышленность. — 2013. — № 4. — С. 41–45.
17. Александров Д.В., Плотников В.С. Гидродинамическое моделирование подземных хранилищ газа // Вестник РГУ нефти и газа. — 2015. — № 2. — С. 63–70.
18. Evans D.J., Chadwick R.A. Underground gas storage: Worldwide practices and future trends // Journal of Petroleum Technology. — 2009. — Vol. 61, No. 7. — P. 48–55.
19. Crotogino F., Mohmeyer K.-U., Scharf R. Salt caverns for underground gas storage // Oil & Gas Science and Technology. — 2001. — Vol. 56. — P. 451–469.
20. International Gas Union (IGU). Global Gas Storage Database. — Paris, 2021.