

## **Бурение скважин и разработка месторождений**

---

УДК 622.691.24:550.8.05

**ДЕТАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА**  
DETAILED CLASSIFICATION OF UNDERGROUND GAS STORAGE FACILITIES

**Ш. А. Арсан, А. К. Ягафаров, Ю. В. Ваганов**

Sh. A. Arsan, A. K. Yagafarov, Yu. V. Vaganov

*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

*Ключевые слова: газ; хранение газа; подземное хранилище газа; объем; классификация*  
*Key words: gas; gas storing; Underground Gas Storage facility; size; classification*

В данной статье рассмотрены вопросы детальной классификации подземных хранилищ газа (ПХГ).

*Подземные хранилища газа в истощенных газовых или нефтяных месторождения (Depleted Natural Gas or Oil Fields).* Впервые природный газ был успешно закачан в хранилище в г. Уэлленд, провинция Онтарио, Канада, в 1915 году. В США первое хранилище было разработано к югу от г. Буффало, штат Нью-Йорк, в 1916 году. К 1930 году насчитывалось девять хранилищ в шести разных штатах. До 1950 года все газовые хранилища были расположены в истощенных месторождениях.

В России первое ПХГ в истощенном месторождении было создано в 1958 году на базе мелких выработанных залежей газа месторождений Куйбышевской (ныне Самарской) области. Успешное проведение закачки и последовавший отбор газа способствовали усилению работ в области подземного хранения газа по всей стране. В том же году началась закачка газа в Елшанское (Саратовская область) и в Аманакское (Куйбышевская область) истощенные газовые месторождения.

В 1979 году началось создание крупнейшего в мире хранилища в истощенном газовом месторождении — Северо-Ставропольского (Ставропольский край). Площадь горного отвода ПХГ составляет более 680 км<sup>2</sup>. Оно создано на основе истощенных одноименных газовых месторождений в зеленой свите (1979 г.) и хадумском горизонте (1984 г.) при аномально низких пластовых давлениях. Данные горизонты являются самостоятельными эксплуатационными объектами, расположенными на глубинах 1 000 и 800 м, и существенно отличаются по своим характеристикам и режимам работы. При строительстве Северо-Ставропольского ПХГ в хадумском горизонте создан долгосрочный резерв, который может быть отобран из хранилища после периода отбора, даже если не производилась дополнительная закачка газа [1–3].

Истощенные месторождения — это естественные подземные резервуары, которые изначально содержали нефть или природный газ (рис. 1, 2). Для обеспечения герметичности в истощенном месторождении (требуется для любого хранилища газа) должны быть непроницаемые покрытие породы (покрышка — Cap rock) либо структурная или стратиграфическая герметичность склонов хранилища. Сама порода резервуара должна иметь достаточную пористость и проницаемость, позволяющие газу перемещаться в резервуар в первую очередь, и позволить производить скопления углеводородов путем первичного производства.

Истощенными месторождениями являются те, из которых уже извлечены запасы нефти и природного газа. Кроме того, использование уже созданных резервуаров для хранения газа позволяет применять оборудование для извлечения и распределения газа, оставшееся со времени, когда месторождения были продуктив-

ными. Наличие этой добывающей сети на месте снижает затраты на преобразование истощенного резервуара в хранилище. Истощенные резервуары привлекают также тем, что их геологические характеристики уже хорошо известны.

Из четырех типов подземных хранилищ истощенные месторождения являются самыми дешевыми и простыми для хранения, использования и эксплуатации.

Основными факторами, которые определяют пригодность истощенных резервуаров в качестве хранилищ, являются географические и геологические факторы.

Географические факторы: истощенные месторождения должны находиться относительно близко к регионам потребления и к транспортной инфраструктуре, в том числе к магистральным трубопроводам и системам распределения.

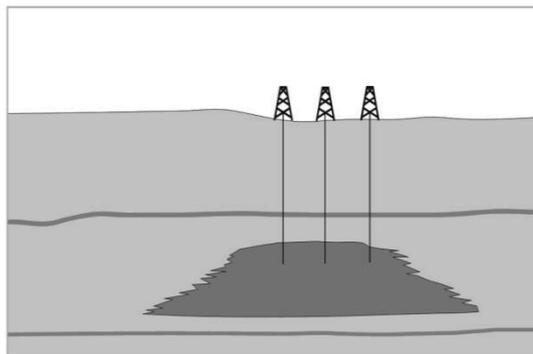
Геологические факторы: истощенные месторождения должны иметь высокую проницаемость и пористость. Пористость породы определяет объем природного газа, который она может удерживать, в то время как проницаемость определяется скоростью, с которой газ проходит через породу, что, в свою очередь, определяет количество закачиваемого газа и отбора рабочего газа.

В целях поддержания давления в истощенных месторождениях около 50 % природного газа в пласте должно храниться в качестве буферного газа. Однако истощенные пласты, уже наполненные природным газом и углеводородами, не требуют закачки того, что станет физически неистощимым газом; этот газ уже существует в породе.

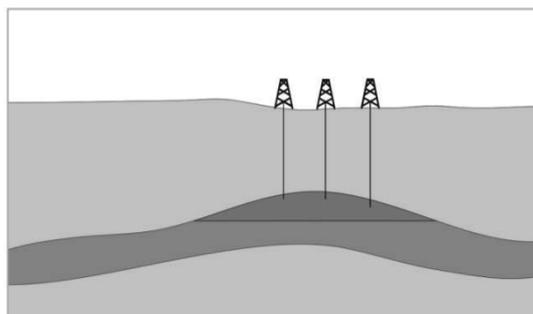
Процесс извлечения газа из хранилища, как правило, повторяет процесс, который первоначально использовался для производства газа из месторождения. В прошлом преобразование месторождения газа в хранилище традиционно состояло в бурении множества новых скважин, что должно было способствовать более быстрому извлечению газа. До начала 1990-х гг. разработка хранилищ в истощенных месторождениях была связана с использованием вертикальных скважин. Это означало, что месторождение, чтобы быть выбранным для развития в хранилище, должно иметь достаточную толщину и пористость.

Преимущества использования истощенных месторождений [4–7]:

- минимальный ущерб для окружающей среды, не считая вызванных буровыми работами;
- несколько точек доступа в резервуар устраняют сбои в обслуживании;
- известна и изучена геология района;



*Рис. 1. Истощенные месторождения — стратиграфическая ловушка*



*Рис. 2. Истощенные месторождения — структурная ловушка*

- нет необходимости в регулярных перерывах для проведения периодических проверок.

Недостатки:

- коллекторы резервуара должны иметь достаточную толщину;
- большинство существующих хранилищ ограничены сезонным обслуживанием;
- как правило, традиционным хранилищам требуется примерно половина общей емкости хранилища для буферного газа.

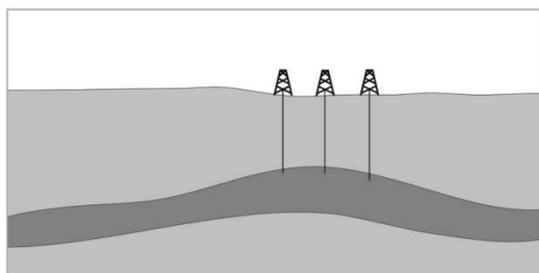
*Истощенные месторождения с горизонтальной системой дренажа (Depleted reservoir storage horizontal drainage system).* Так как технология горизонтального бурения стала коммерчески выгодна для разведки и добычи нефти и газа в конце 1980-х — начале 1990-х гг., стало очевидно, что эта же технология может быть использована для повышения производительности газовых хранилищ. Благодаря возможности бурить горизонтальные стволы одна скважина может достичь того уровня производительности, который делает возможным хранение газа в нескольких истощенных месторождениях, ранее признанных неподходящими для обустройства в качестве газовых хранилищ [3, 5].

Преимущества:

- все вышеуказанные преимущества традиционных хранилищ истощенных месторождений;
- более экономное использование хранилищ истощенных месторождений, которое было бы невозможно в других случаях;
- более широкое географическое применение разработки хранилищ;
- возможна более высокая производительность закачки и отбора;
- требования к буферному газу ниже, чем у водоносных горизонтов, традиционных истощенных месторождений и неглубоких соляных каверн.

Недостатки: не все геологические породы пригодны для разработки с использованием горизонтальных скважин; необходимость тщательной интеграции знаний в области геологии, резервуаров и бурения.

*Водонасыщенные пласты (Aquifers).* Водоносные горизонты — подземные пористые проницаемые горные формирования, которые действуют в качестве природных водных резервуаров (рис. 3).



*Рис. 3. Водоносный горизонт — нет предыдущих углеводородов*

Однако в определенных ситуациях эти пласты могут быть восстановлены и использованы в качестве ПХГ. Так как они дороже, чем разработка истощенных месторождений, этот тип хранилищ, как правило, используется только в тех местах, где поблизости нет истощенных месторождений. Традиционно эти объекты эксплуатируются в течение только одного зимнего периода отбора, хотя они могут быть также использованы для покрытия пиковой нагрузки. Водоносные структуры составляют лишь около 13 % от количества подземных хранилищ [8, 9].

Водоносные структуры являются наименее предпочитаемым и самым дорогим видом ПХГ из-за целого ряда причин. Во-первых, геологические характеристики водоносных горизонтов не так досконально известны, как у истощенных месторождений. Значительное количество времени и денег уходит на обнаружение геологических характеристик водоносного горизонта и на определение его пригодности в качестве ПХГ. Должны быть выполнены сейсмические исследования, как это делается для разведки потенциальных залежей природного газа. Минералогиче-

ский, состав и пористость пласта, а также существующее пластовое давление должны быть выявлены до начала разработки пласта. Кроме того, емкость резервуара неизвестна и может быть определена только при дальнейшей разработке хранилища.

Для того чтобы преобразовать природные водоносные структуры в эффективные природные хранилища газа, также должна быть разработана вся сопутствующая инфраструктура. Это включает в себя бурение скважин, добывающее оборудование, трубопроводы, обезвоживание, и, возможно, компрессорное оборудование. При использовании водоносных горизонтов требуется мощное оборудование для закачки, и необходимо поддерживать достаточное давление для заполнения пласта природным газом.

Кроме того, водоносные структуры, как правило, требуют гораздо больше «буферного газа» (Cushion gas), чем истощенные месторождения. Поскольку в водоносных структурах газ не возникает естественным путем, то, соответственно, нет и газа, с которого можно было бы начать, то есть определенное количество закачиваемого природного газа в конечном итоге окажется физически не использованным. В пластах водоносных структур потребность в буферном газе может достигать до 80 % от общего объема газа. В то время как вполне возможно извлечь буферный газ из истощенных месторождений, извлечение таким образом из пластов водоносного горизонта может иметь негативные последствия, в том числе и повреждение породы. Таким образом, большая часть буферного газа, который вводится в любое хранилище водоносного горизонта, останется без возможности восстановления, даже после того как хранилище закроют. Большинство хранилищ водоносного горизонта были разработаны, когда стоимость природного газа была невысокой. Однако с более высокими ценами водоносные горизонты слишком дорогие для разработки.

Все эти факторы означают, что развитие водоносного горизонта в качестве хранилища может быть трудоемким и дорогим. В некоторых случаях развитие водоносного горизонта может занять четыре года, что более чем вдвое превышает время, необходимое для разработки истощенных месторождений в качестве хранилищ. В дополнение к увеличению сроков и стоимости хранилищ водоносного горизонта существуют также экологические ограничения в использовании водоносных горизонтов в качестве хранилища природного газа. В начале 1980-х гг. Агентство по охране окружающей среды (EPA) установило определенные правила и ограничения на использование водоносных горизонтов для хранения природного газа. Эти ограничения предназначены для того, чтобы уменьшить вероятность загрязнения свежей воды [6, 7].

Преимуществом водонасыщенных пластов является обеспечение развития хранилищ газа в местах, где залежи углеводородов недоступны или не подходят для хранения природного газа.

Недостатки: поддержание целостности поверхности газ/вода накладывает ограничения на производственную гибкость; относительно большой процент соотношения буферного газа к рабочему; высокий потенциал для загрязнения водоснабжения.

*Соляные пещеры (Salt Caverns).* Залежи галита (каменная соль) — пещеры (или каверны), созданные в массивных подземных залежах каменной соли и способных эффективно сохранять закачиваемые газы (рис. 4). Пустоты могут быть образованы обычными горными работами или чаще путем бурения скважины сквозь соль и перекачиванием пресной воды, чтобы растворить соль, образуя рассол, который затем извлекается путем откачки. Подземные залежи соли предлагаются как еще один вариант для хранения природного газа. Эти породы хорошо подходят для хранения природного газа в соляных кавернах. Стены соляной каверны также

имеют структурную прочность стали, что делает ее очень устойчивой к износу хранилища в течение всего срока эксплуатации [8, 9].

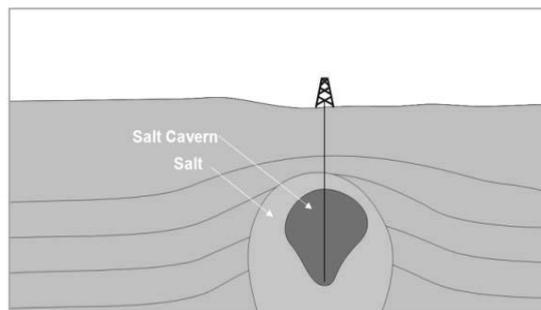


Рис. 4. Соляные каверны

бы сформировать большую структуру в виде купола. Они могут быть большими (1 000 м в диаметре и 9 000 м в высоту). Как правило, соляные купола, используемые для хранения природного газа, находятся в пределах от 2 000 до 500 м под поверхностью, хотя при определенных обстоятельствах они могут находиться гораздо ближе к поверхности. Соляные пласты мельче, тоньше. Они обычно не превышают 300 м в высоту. Так как соляные пласты широкие и тонкие, они более склонны к износу, а также могут быть дороже в разработке, чем соляные купола [3, 5, 8–11].

Как только обнаружены подходящие залежи соляного купола или соляного пласта, считающиеся пригодными для хранения природного газа, необходимо разработать соляную пещеру в пласте. В основном процесс состоит в использовании воды, чтобы растворить и извлечь определенное количество соли из залежей, оставив большое пустое место в пласте. Это делается путем бурения скважин и заливки большого количества воды через законченную скважину. Эта вода растворит некоторое количество соли в залежи и, когда ее выкачают из скважины, оставит большое пустое пространство, которое ранее занимала соль. Этот процесс известен как выщелачивание соляных каверн (Salt cavern leaching).

Выщелачивание соляных каверн используется для создания каверн в обоих видах солевых залежей и может быть довольно дорогим. Однако после создания соляная пещера представляет собой подземную природную емкость для хранения газов. Кроме того, требования буферного газа являются самыми низкими из всех четырех типов хранилищ: в соляных пещерах буферного газа требуется лишь около 33 % от общего объема емкости.

Соляные каверны, как правило, значительно меньше, чем истощенные месторождения и водоносные структуры, и равняются только одной сотой площади, занятой истощенным газовым месторождением. Таким образом, соляные каверны не могут вместить тот объем газа, который необходим для удовлетворения базовых требований хранилища. Однако коэффициенты закачки и отбора из соляных пещер, как правило, намного выше, чем из водоносных структур и истощенных месторождений. Следовательно, природный газ, который хранится в соляных кавернах, может быть легко и быстро изъят, и пещеры могут быть снова наполнены природным газом гораздо быстрее, чем любой другой тип хранилища. Кроме того, соляные пещеры легко могут начать выпускать газ, со скоростью в один час, что будет полезным в чрезвычайных ситуациях или во время неожиданного краткосрочного возрастания спроса. Соляные каверны составляют около 6 % от всех хранилищ.

Преимущества соляных каверн: высокие коэффициенты закачки и отбора; мультицикличность.

По сути, соляные каверны формируются из имеющихся солевых залежей.

Эти подземные залежи соли могут существовать в двух возможных формах: соляном куполе (Salt domes) и соляном пласте (Salt beds). Соляные купола — толстые пласты, созданные из природных залежей солей, которые с течением времени проникают через вышележащие осадочные слои, что-

Недостатки: высокий процент от общего объема закачиваемого газа необходим в качестве буферного газа; экологические проблемы, связанные с соляным раствором во время строительства и эксплуатации; объем каждой пещеры имеет практические и геологические ограничения; высокие производственные затраты из-за коррозионной среды.

*Заброшенные шахты (Abandoned Mines).* Предпринимаются попытки использовать заброшенные шахты для хранения природного газа. По крайней мере, одно такое хранилище используется в США. Потенциал пещер из твердых горных пород для хранения природного газа должен пройти соответствующие испытания, однако в настоящее время еще не существует таких коммерчески готовых к эксплуатации хранилищ.

Таким образом, в настоящее время не только добыча, но и хранение газа — довольно проблемный вопрос, так как подземные хранилища газа — неотъемлемая составляющая энергетической системы страны. Нами представлены детальная классификация ПХГ и информация о них с целью выбора наиболее лучшего варианта для хранения газа.

С экономической точки зрения строительство ПХГ является выгодным проектом.

С технической точки зрения это очень сложный процесс, и риски всегда есть. Так, в результате исследования было выявлено, что хранение газа в выработанных месторождениях нефти и газа является базовым методом хранения. Данные выводы основываются на следующих фактах: выработанные месторождения нефти и газа полностью разведаны, известны геометрические размеры и форма площади газоносности, геолого-физические параметры пласта, начальное давление и температура, состав газа, изменение во времени дебитов скважин, коэффициентов фильтрационных сопротивлений, режим разработки месторождения, технологический режим эксплуатации, герметичность покрытия.

При проектировании ПХГ в ловушках водонасыщенных коллекторов существует опасность потерь газа через кровлю хранилища, каналы в цементном камне, за колонные скважины, тектонические нарушения горных пород и другие возможные пути миграции газа. Следовательно, в процессе разведки и опытной закачки газа необходимо доказать герметичность кровли ловушки, рассчитать и определить важные параметры и характеристики водонасыщенных пластов для хранения газа.

#### *Библиографический список*

1. Ширковский А. И. Подземное хранение газа. — М.: Гостоптехиздат, 1960. — 75 с.
2. Правила создания и эксплуатации подземных хранилищ газа в пористых пластах (ПБ 08-621-03). Серия 08. Выпуск 11. — М.: НТЦ Госгортехнадзора, 2003. — 48 с.
3. ATG. Aide-memoire de l'industrie du gaz. — Paris, 1990. — 884 с.
4. Нагорный В. П., Глоба В. М. Подземные хранилища углеводородов. — Киев, 2014. — 287 с.
5. Flanigan O. Underground Gas Storage Facilities: Design and Implementation. — London, 1995. — 198 с.
6. United Nations Economic Commission for Europe in close cooperation with International Gas Union. — Geneva, 2013.
7. Commission staff working document Accompanying the document communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions on an EU strategy for liquefied natural gas and gas storage. — Brussels, 2016. — 35 p. — Available at: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1\\_EN\\_ACT\\_part1\\_v10-1.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_ACT_part1_v10-1.pdf).
8. Смирнов В. И. Строительство подземных газонефтехранилищ. — М., 2000.
9. Физика пласта, добыча и подземное хранение газа / О. М. Ермилов [и др.]. — М., 1996.
10. Сидоренко М. В. Подземное хранение газа. — М., 1965. — 140 с.
11. Кортаев Ю. П., Ширковский А. И. Добыча, транспорт и подземное хранение газа. — М., 1984.

#### *Сведения об авторах*

**Арсан Шади Арсанович**, аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89803242763, e-mail: shadiarsan@geologist.com

**Ягафаров Алик Каюмович**, д. г.-м. н., профессор, академик РАН, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89504931998

**Ваганов Юрий Владимирович**, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой бурения нефтяных и газовых скважин, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)993177, e-mail: burenie@rambler.ru

#### *Information about the authors*

**Arsan Sh. A.**, Postgraduate at the Department of Development and Exploitation of Oil and Gas Fields, Industrial University of Tyumen, phone: 89803242763, e-mail: shadiarsan@geologist.com

**Yagafarov A. K.**, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Industrial University of Tyumen, phone: 89504931998

**Vaganov Yu. V.**, Candidate of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Drilling of Oil and Gas Wells, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)993177, e-mail: burenie@rambler.ru