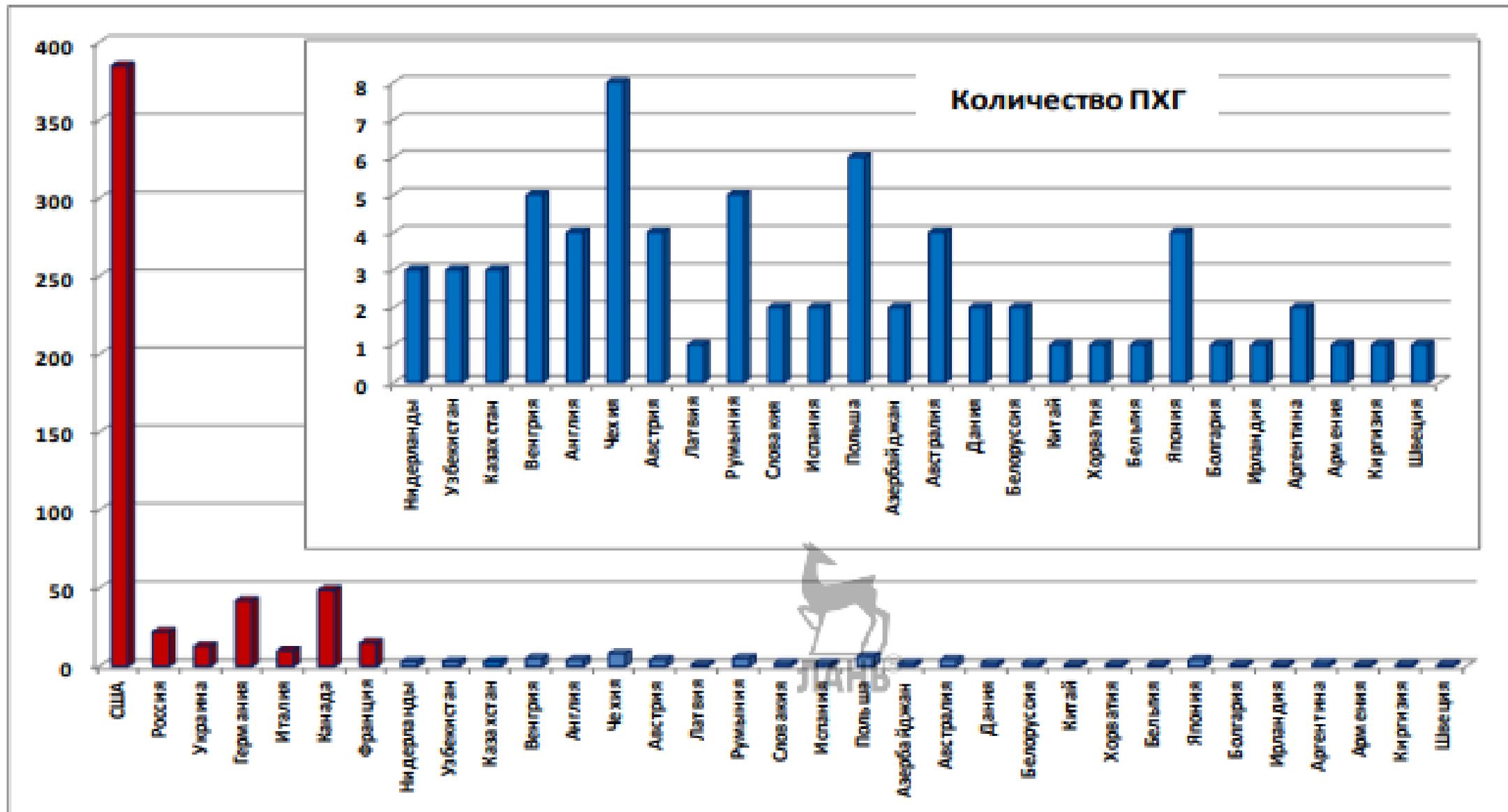


Подземное хранение газа (ПХГ)

Основные положения

- ✓ ПХГ – геологическая структура или искусственный резервуар, используемый для хранения газа
- ✓ ПХГ – одно из звеньев в комплексе объектов ЕСГ
- ✓ ПХГ позволяет обеспечить наиболее рациональную структуру потребления газа (закачка в летнее время / возможность восполнения повышенного спроса в отопительный сезон)
- ✓ ООО “Газпром ПХГ” зарегистрировано в 2007г. – единый оператор подземных хранилищ газа России
- ✓ Структура компании: 23 ПХГ
 - ✓ 14 – в истощенных месторождениях
 - ✓ 8 – в водоносных структурах
 - ✓ 1 – в отложениях каменной соли (Калининградское ПХГ – самое молодое в системе ПХГ «Газпрома» единственное в России, созданное в соляных кавернах)
- ✓ Максимальная суточная производительность отбора на начало сезона 2022/2023 г. – 852,4 млн. м³
- ✓ В состав входит: 20 компрессорных станций, фонд эксплуатационных скважин – 2 708
- ✓ Крупнейшее в мире ПХГ – Северо-Ставропольское ПХГ
- ✓ В перспективе максимальная суточная производительность российских ПХГ – 1 млрд. м³ сут. Аналогичный показатель для всех ПХГ в мире 7,4 млрд. м³ сут.
- ✓ В регионах, отличающихся значительными объемами потребления в стадии проектирования и строительства находятся: Новомосковское (Тульская область), Арбузовское (Республика Татарстан), Шатровское (Курганская область) ПХГ
- ✓ Реконструкция, расширение, техническое перевооружение ряда действующих ПХГ

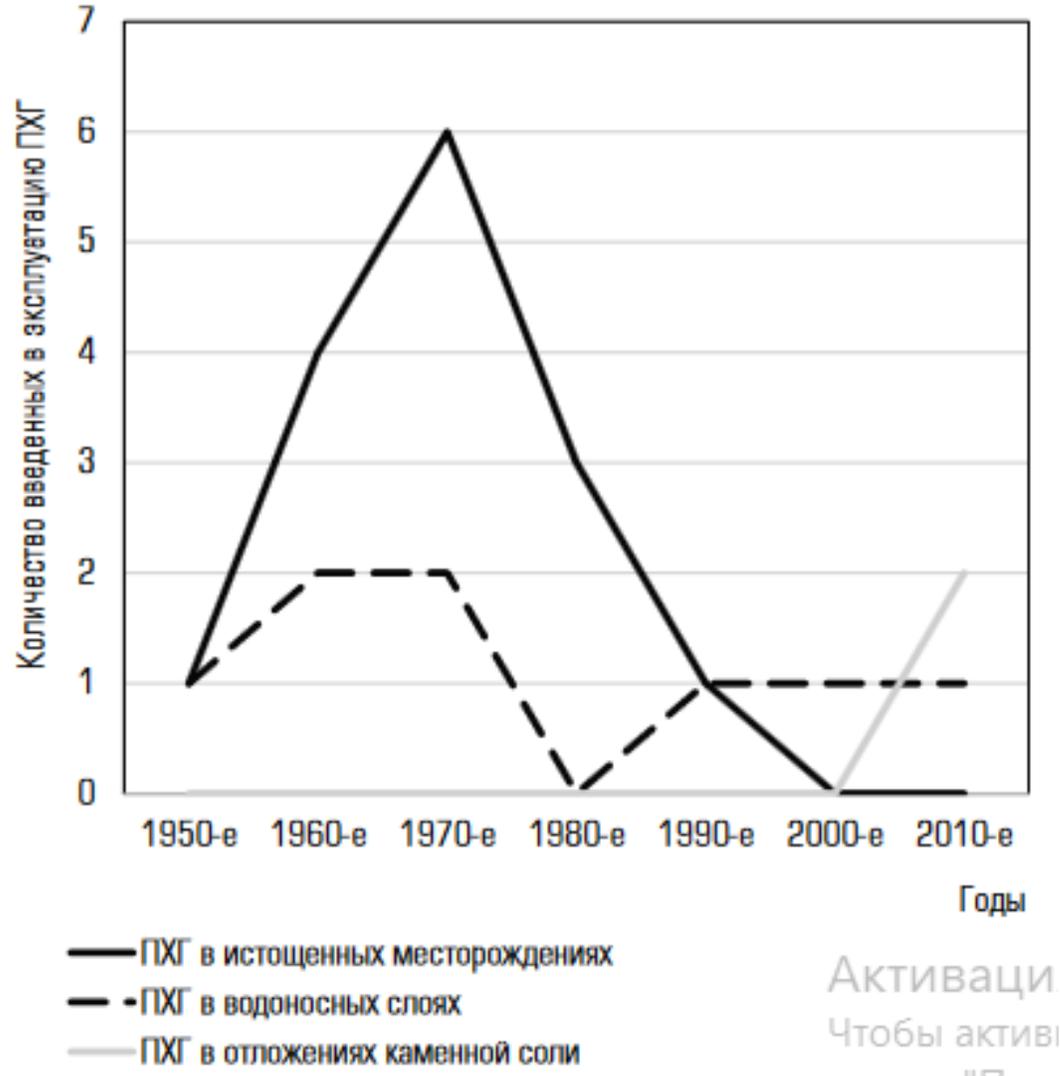
Количество ПХГ в мире (по состоянию на 2006 г.)



Совокупная активная ёмкость ПХГ

Регион	На 01.01.2006 г.		На 01.01.2013 г.	
	Активный объём, млрд.м ³	Доля в мировых мощностях ПХГ, %	Активный объём, млрд.м ³	Доля в мировых мощностях ПХГ, %
Северная Америка	115,7	34,71	138,1	38,67
СНГ (в т. ч. Россия)	104,6	31,39	113,6	31,83
Европа (в т. ч. Украина)	110,7	33,22	96,7	27,10
Азия и Австралия	2,1	0,62	7,0	1,97
Ближний Восток	-	-	1,4	0,40
Латинская Америка	0,2	0,06	0,1	0,03
Всего	333,3	100	357,0	100

Ввод в эксплуатацию ПХГ в России (СССР) по типам



Мастобаев Б.Н., Китаев С.В., Малюкова Н.Н., Шамсутдинов М.М.
 Хранилища углеводородного газа. СПб.: Недра, 2018. 216 с.

Некоторые ПХГ России

Наименование ПХГ		Вид хранилища	Объём, усл.ед.
Песчано-Уметское		В истощённом месторождении	3,7
Елшанское (истоц. газ.местор. 1958 г.)			4,5
Степновское			9,0
Дмитриевское		В истощённом месторождении	0,1
Михайловское			0,2
Аманакское			0,1
Кирюшкинское			0,9
Щёлковское		В водоносном пласте	3,3
Калужское (первое в вод. пл, 1959 г)			0,5
Касимовское			19,0
Увязовское			3,1
Невское		В водоносном пласте	3,3
Гатчинское			0,5
Северо-Ставропольское	Зелёная свита	В истощённом месторождении	7,7
	Хадум		56,0
Краснодарское		В истощённом месторождении	2,1
Кущёвское			9,2
Канчуриновское		В истощённом месторождении	4,6
Мусинское			0,1

Концепция создания ПХГ

- ✓ Концепция является первичным документом создания ПХГ, выполняется на основе компьютерной модели совместного функционирования единой системы газоснабжения (ЕСГ) и ПХГ, составляется на период 10 лет (при необходимости на более длительный срок) и уточняется один раз в 5 лет.
- ✓ Задачей Концепции является оценка неравномерности газопотребления, перспектив ее изменения и разработки стратегии ее регулирования за счет создания системы ПХГ в ЕСГ.

Содержание Концепции

- описание и результаты адаптации компьютерной модели ЕСГ с системой ПХГ
- анализ фактического выполнения Концепции за предшествующий пятилетний период
- анализ неравномерности потребления газа в ЕСГ и возможности использования альтернативных источников энергии
- оценку перспективы изменения объемов сезонной и суточной неравномерности газоснабжения в ЕСГ
- программу геологоразведочных работ для создания новых и расширения действующих ПХГ (оценка сроков разведки, емкостных параметров перспективных объектов для хранения газа на основе существующих фондовых геологических, геофизических, аэрокосмических данных)
- программу создания новых, расширения и реконструкции действующих ПХГ (оценка сроков создания, активного объема газа, суточной производительности ПХГ)
- оценку экономической эффективности программ (геологоразведочных работ, создания новых ПХГ, расширения, реконструкции действующих ПХГ)

Поиск и разведка структур для создания ПХГ

Предусматриваются следующих работ:

- сейсмические исследования структуры (геофизические методы исследования структуры, строения и состава горных пород)
- структурное бурение
- разведочное бурение скважин
- промыслово-геофизические, гидродинамические (гидроразведка), геохимические и др. исследования
- разведочная закачка газа (при необходимости и технической возможности)
- обработка полученных результатов и выдача исходных данных

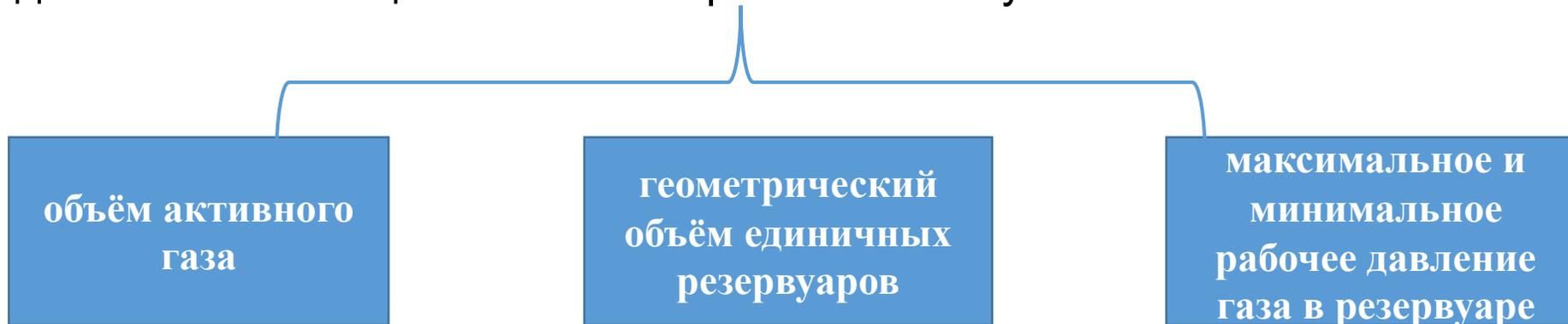
Исходные данные для технологического проектирования ПХГ

- ✓ общие сведения о районе и площади разведочных работ (привязка к местности, гидрография, населенные пункты и т.д.)
- ✓ результаты сейсморазведочных работ и разведочного бурения
- ✓ литолого-стратиграфическую характеристику разреза в пределах разведанной площади
- ✓ тектоническое строение разведочной площади
- ✓ литолого-геофизическую характеристику всех водоносных пластов-коллекторов и пластов-покрышек
- ✓ анализ результатов исследования керна, полученного при разведочном бурении
- ✓ результаты промыслово-геофизических, геохимических и гидродинамических исследований
- ✓ техническое состояние фонда пробуренных на площади скважин и их конструкцию
- ✓ оценку емкостной и фильтрационной характеристик пластов-коллекторов
- ✓ анализ разведочной закачки газа (при проведении)

Условия создания ПХГ

В общем случае:

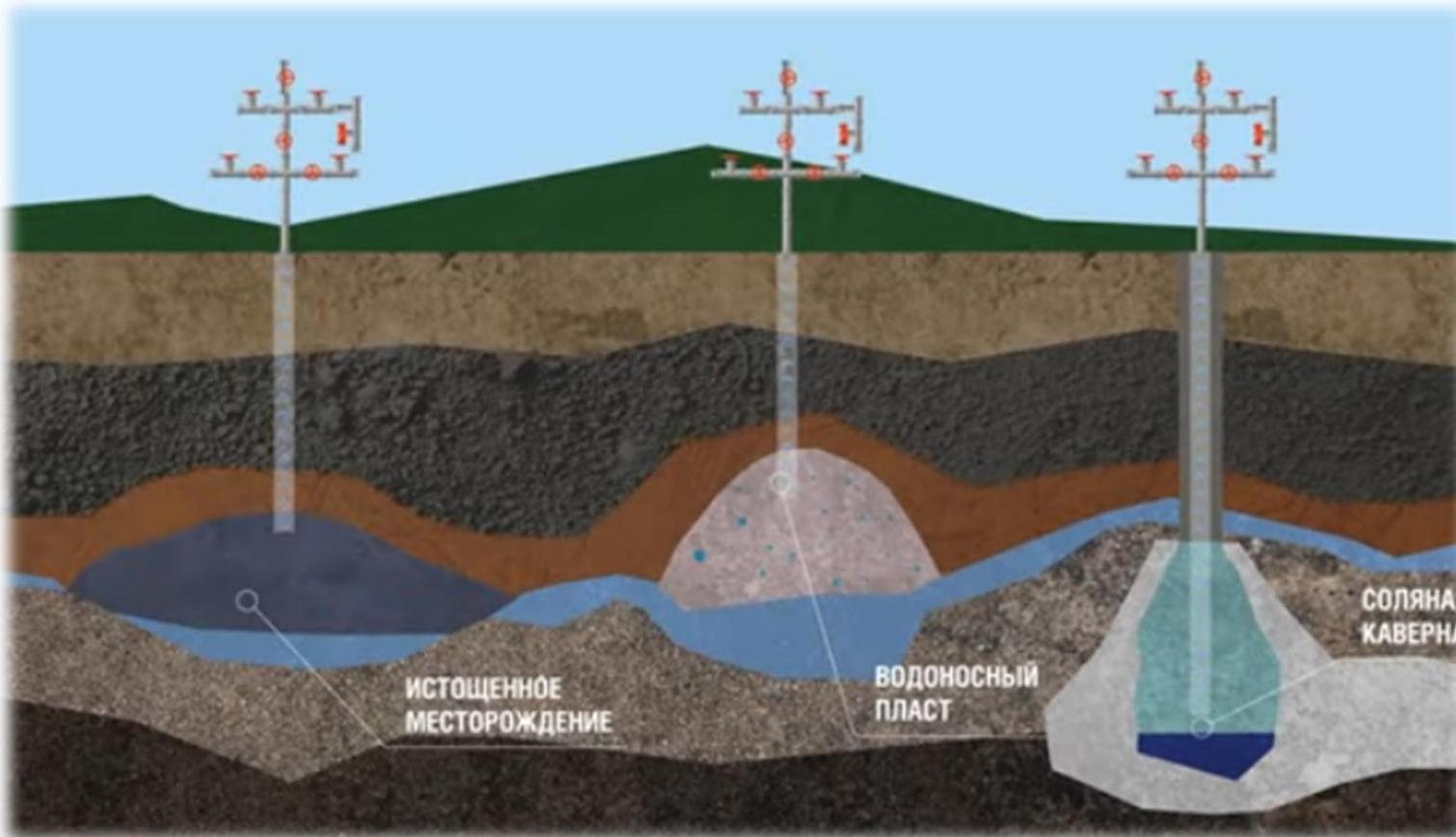
- ✓ наличие геологической структуры (чаще куполообразной), пласта-коллектора, способного хранить газ
- ✓ наличие герметичной покрышки
- ✓ достаточная толщина пласта и приемлемая глубина его залегания



для ПХГ в соляных массивах:

- ✓ обеспеченность площадок строительства водой для подземного растворения соли
- ✓ возможность удаления хлор-натриевого рассола, образующегося при создании резервуаров

- ✓ **Искусственная газовая залежь**, находящаяся под воздействием внешних технологических и внутренних природных сил - основа газохранилища в пористом пласте.
- ✓ Для стабилизации и поддержания этой системы в рабочем состоянии предусматривается соответствующее **техническое обустройство**.



Водоносное газохранилище - искусственная газовая залежь, созданная в пласте, в естественных условиях заполненном водой.

Характеристики водоносного пласта (в среднем):

- ✓ проницаемость не менее $0,2 - 0,3$ мкм², мощность - не менее 4 - 6 м
- ✓ пористость не ниже 10 - 15 %
- ✓ проницаемость покрышки, обычно представленной глинами, не должна быть более сотых долей миллдарси
- ✓ объём водонапорной системы должен превосходить объём хранилища в несколько сот раз (иначе заполнение хранилища газом за счёт упругости системы будет затруднено)

Строительство ПХГ в отложениях каменной соли

- ✓ Применяемый метод строительства - **растворение через буровые скважины.**
- ✓ Возможен для реализации, если помимо каменной соли достаточной мощности и приемлемой глубины залегания, имеется надёжный **источник технического водоснабжения**, а также метод утилизации строительного рассола
- ✓ Наиболее надёжным источником технического водоснабжения – эксплуатация подземных водоносных горизонтов.
- ✓ Извлекаемый на поверхность рассол возможно:
 - передавать солепотребляющим предприятиям на переработку
 - захоранивать в глубокие водоносные горизонты

Классификация подземных хранилищ газа

ПХГ по режиму работы:



Классификация подземных хранилищ газа

По количеству объектов подразделяются на:

- однопластовые
- многопластовые

По виду пластовой энергии подразделяются на ПХГ:

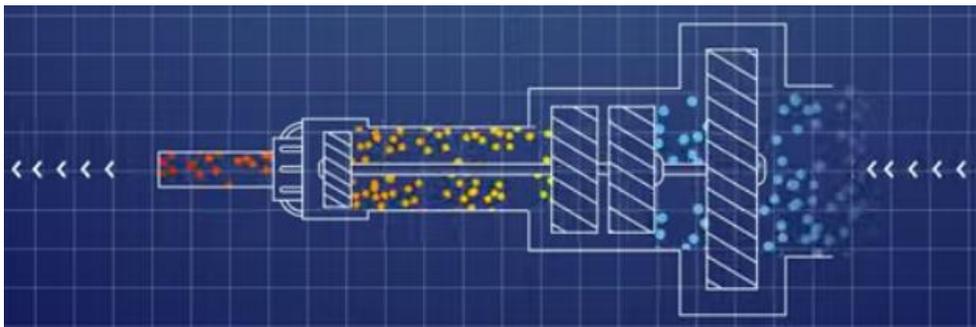
- с газовым режимом (постоянный газонасыщенный поровый объем)
- с водонапорным режимом (переменный газонасыщенный поровый объем)

Характеристика эксплуатации ПХГ

- ✓ **Базисная** – циклическая эксплуатация в базисном технологическом режиме (**суточная производительность** при отборах и закачках ПХГ **не существенно отличается** от среднемесячной производительности)
- ✓ **Пиковая** – циклическая эксплуатация в пиковом технологическом режиме (**большие приросты**, свыше 10-15%, **суточной производительности ПХГ** в течение нескольких суток при отборах и закачках относительно среднемесячных производительностей)

← газ

ГПА

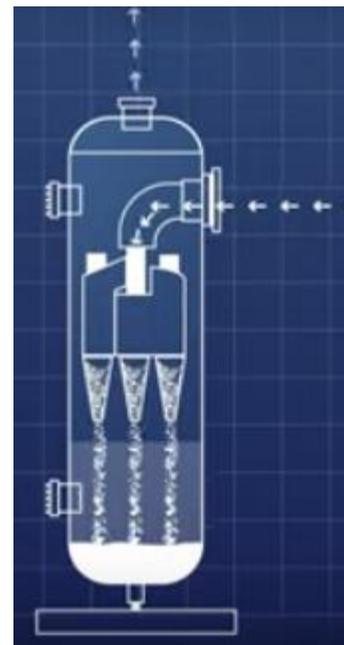


$T = 135 - 140 \text{ } ^\circ\text{C}$

Пункт учета
и замера
газа

Выход очищенного

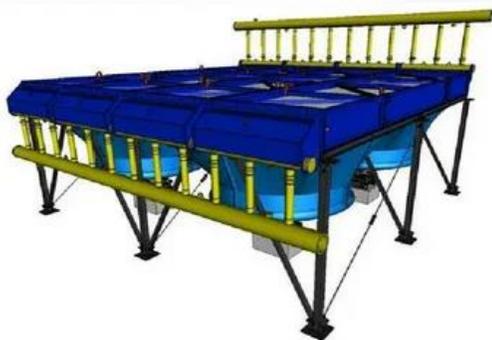
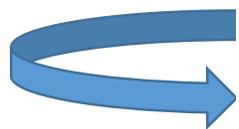
газа



Неочи-
щенный
газ

Циклонный
пылеуловитель

Неочи-
щенный
газ



АВО газа



Сборный пункт

Первое поколение ГПА



Газомотокомпрессор 10 ГКН (1967 г.)

- ✓ Небольшая мощность не соответствует растущим показателям активной емкости и суточной производительности газовых хранилищ
- ✓ Возникла необходимость оснащения компрессорных станций ПХГ высокопроизводительной техникой

Марка ГПА	Мощность, кВт	Частота вращения вала, об/мин	Число цилиндров двигателя	Наибольшее число цилиндров компрессора	КПД двигателя	Модификация				
						Давление, МПа		Подача, млн. м ³ /сут	Масса, т	Удельная масса, кг/кВт
						всасывания	нагнетания			
<i>Поршневые ГПА</i>										
ГМВ	441	600	8	4	0,275	0,3 – 0,35	1,3 – 1,5	0,120 – 0,166	25,2	57
10ГКМ	736	300	10	5	0,226	2,5	5,5	0,554	58,5	79,7
10ГКН	1104	300	10	5	0,30	3,0 – 3,8	5,6	0,984 – 1,248	63,6	57,6

ГПА для подземных хранилищ газ

Параметр	ГПА-4ПХГ	ГПА-10ПХГ
Номинальная мощность, МВт	4	10
Коммерческая производительность, млн. нм ³ /сут	1,8...2,5	4,0...11,3
Давление компрессора, МПа	9,92...14,4	7,45...14,4
Степень сжатия	2,2...3	1,57...3,26
Политропный КПД компрессора	0,76...0,80	0,76...0,83
Частота вращения ротора силовой турбины, об/мин	14000	9000
Эффективный КПД ГТУ (в стационарных условиях)	0,24	0,34
Удельный расход топливного газа ГТУ, кг/кВт·ч	0,303	0,212
Давление газа (max), МПа: - пускового - топливного	0,6 1,5	0,6 3,0
Тип масла: - двигателя - компрессора	МС-8П ТП-22С	МС-8П ТП-22С
Масса, тонн	98	185



Газоперекачивающий агрегат на компрессорной станции «Пермская»

ГПА для линейных компрессорных станций



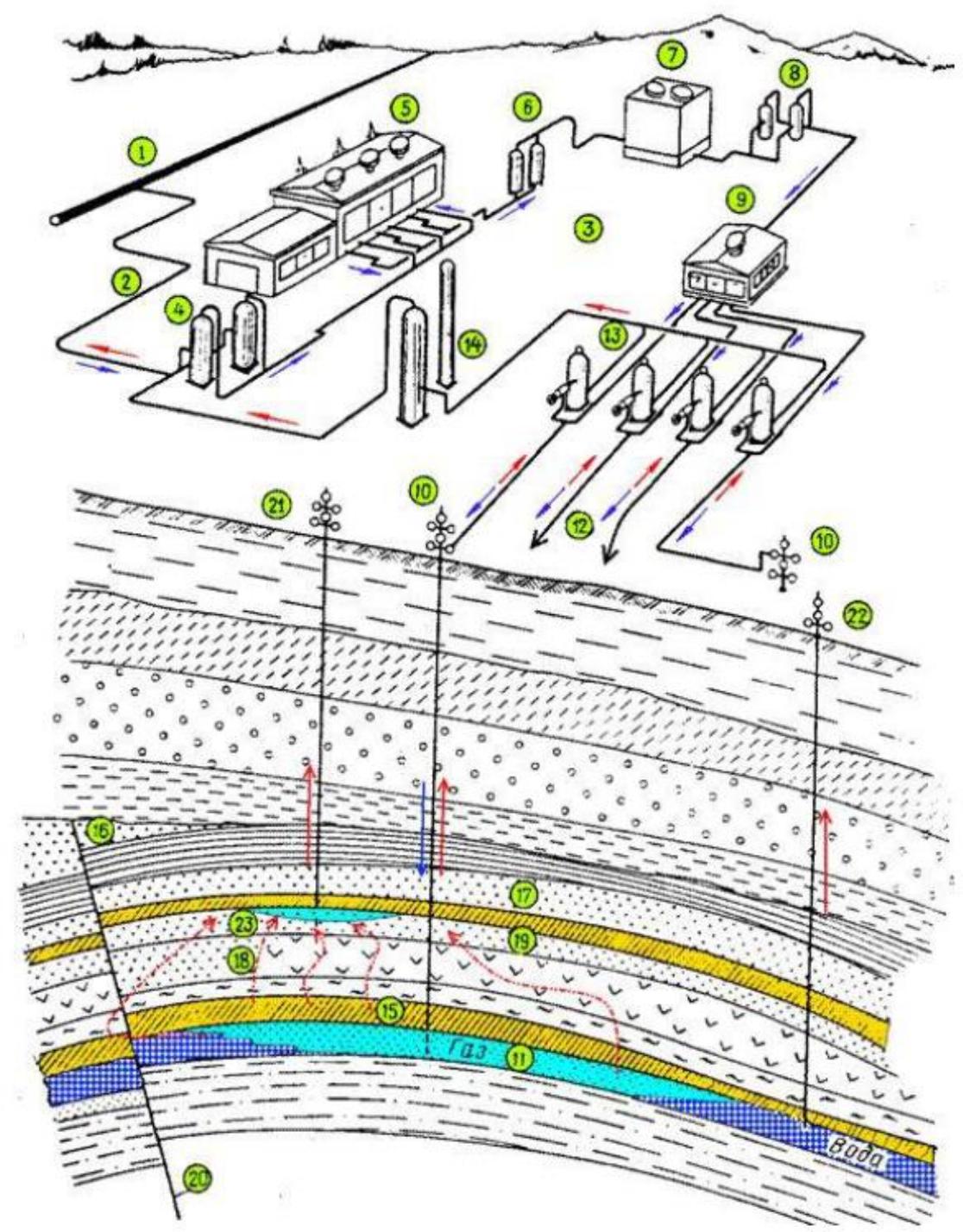
Газоперекачивающий агрегат мощностью 12 МВт на компрессорной станции «Краснодарская»

Параметр	ГПА-6,3	ГПА-12	ГПА-16	ГПА-25
Номинальная мощность, МВт	6,3	12	16	25
Коммерческая производительность, млн. нм ³ /сут	11,5	20,4...32,6	22,0...35,0	44,5...57,0
Давление компрессора, МПа	5,49	5,45...9,61	5,45...8,33	7,45
Степень сжатия	1,44	1,32...1,7	1,44...1,61	1,37...1,5
Политропный КПД компрессора	0,84	0,85-0,86	0,85-0,86	0,85-0,86
Частота вращения ротора силовой турбины, об/мин	8200	6500	5300	5000
Эффективный КПД ГТУ (в стационарных условиях)	0,30	0,34	0,363	0,395
Удельный расход топливного газа ГТУ, кг/кВт·ч	0,239	0,208	0,192	0,177
Давление газа (max), МПа:				
- пускового	0,294	0,6	0,6	0,6
- топливного	0,49	3,0	3,2	4,5
Тип масла:				
- двигателя	МС-8П	МС-8П	МС-8П	МС-8П
- компрессора	ТП-22С	ТП-22С	ТП-22С	ТП-22С
Масса, тонн	-	170	220	310
Общий ресурс, тыс. часов	100	100	100	100

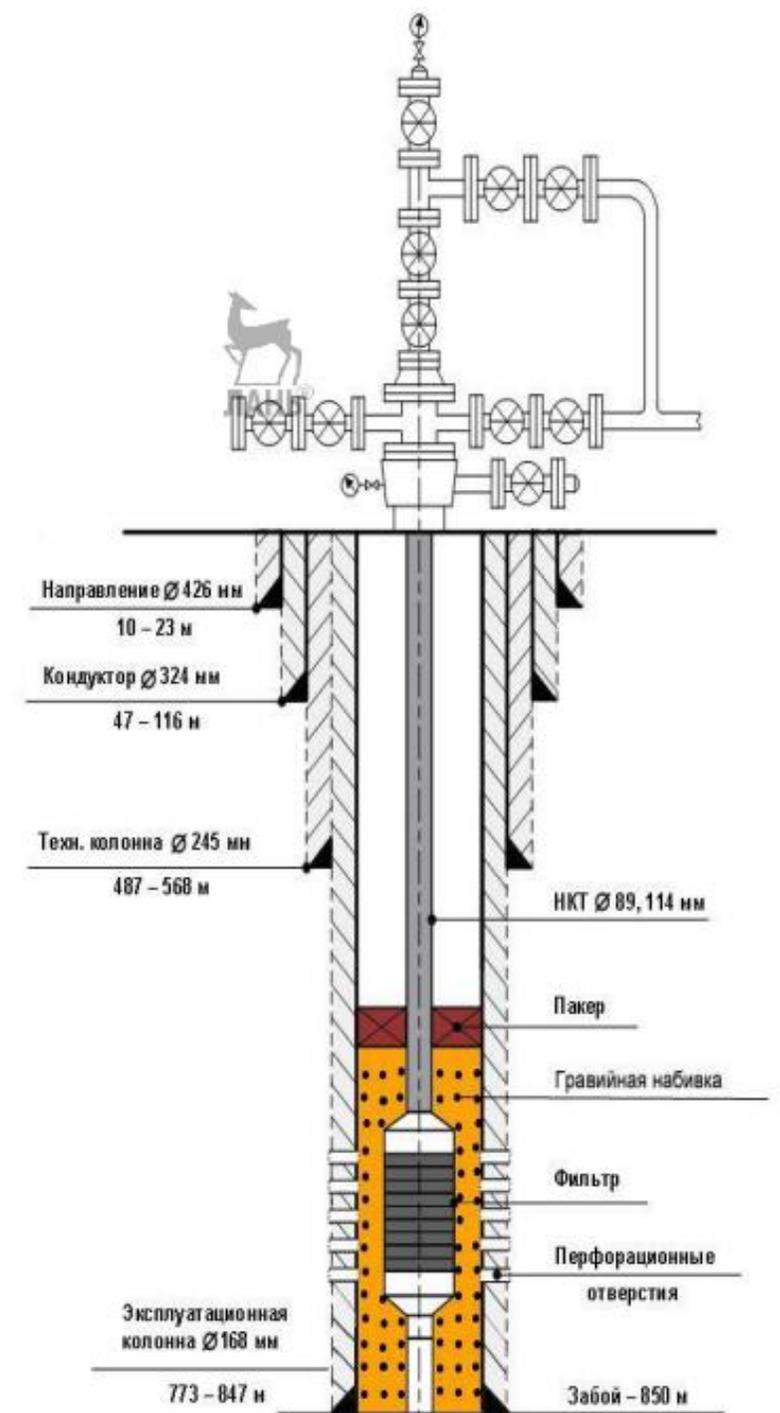
- ✓ Закачка газа происходит при переменном давлении и расходе закачиваемого газа.
- ✓ Компрессорные станции (КС) на ПХГ должны иметь большой диапазон регулирования подачи – **от 5% в период первоначального заполнения до 100% при проектной приемистости коллектора.**
- ✓ Применяют параллельно – последовательное включение агрегатов. Диапазон рабочих давлений КС определяется пластовым давлением, давлением в подводящем газопроводе и потерями давления в пласте, скважинах и шлейфах.

Принципиальная схема ПХГ в водоносном горизонте

- 1 – МГ;
- 2 – шлейф (соединительный газопровод);
- 3 – территория комплекса ПХГ;
- 4 – пылеуловители;
- 5 – КС;
- 6 – сепараторы;
- 7 – охлаждение газа;
- 8 – очистная установка (8);
- 9 – распределительный пункт;
- 10 – эксплуатационные скважины;
- 11 – водоносный пласт;
- 15 – непроницаемый купол;
- 16 – выклинивания в осадочных породах;
- 18 – аномалии, такие как литологические изменения;
- 19 – контрольный пористо-водоносные пласты;
- 20 – разрывы, за счет которых газ может покинуть хранилище, попасть в пласты, залегающие выше, или даже выйти на поверхность;
- 21 – контрольные скважины;
- 22 – наблюдательные скважины;
- 23 – вторичная залежь.



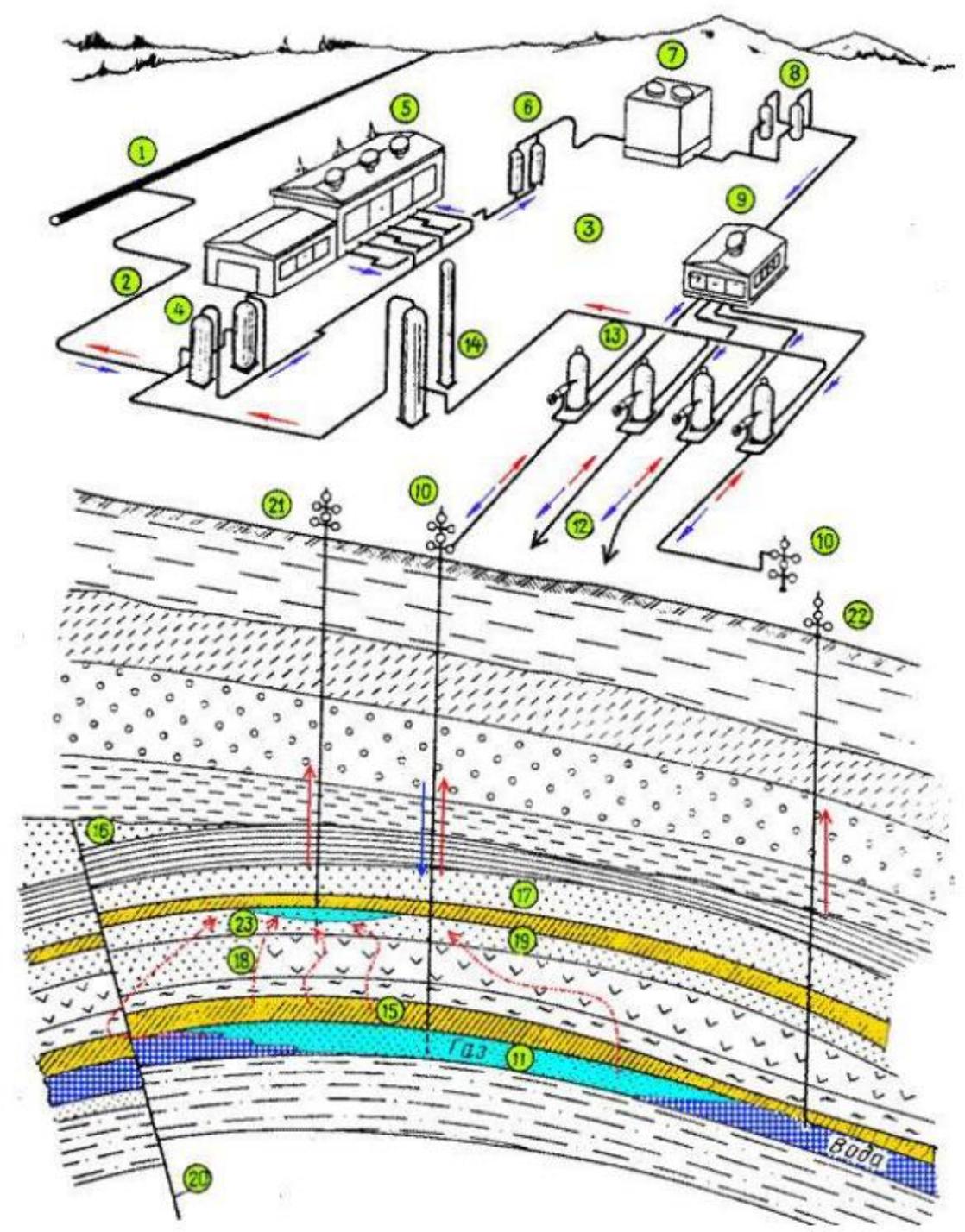
Пример устройства скважины с фильтром в колонне



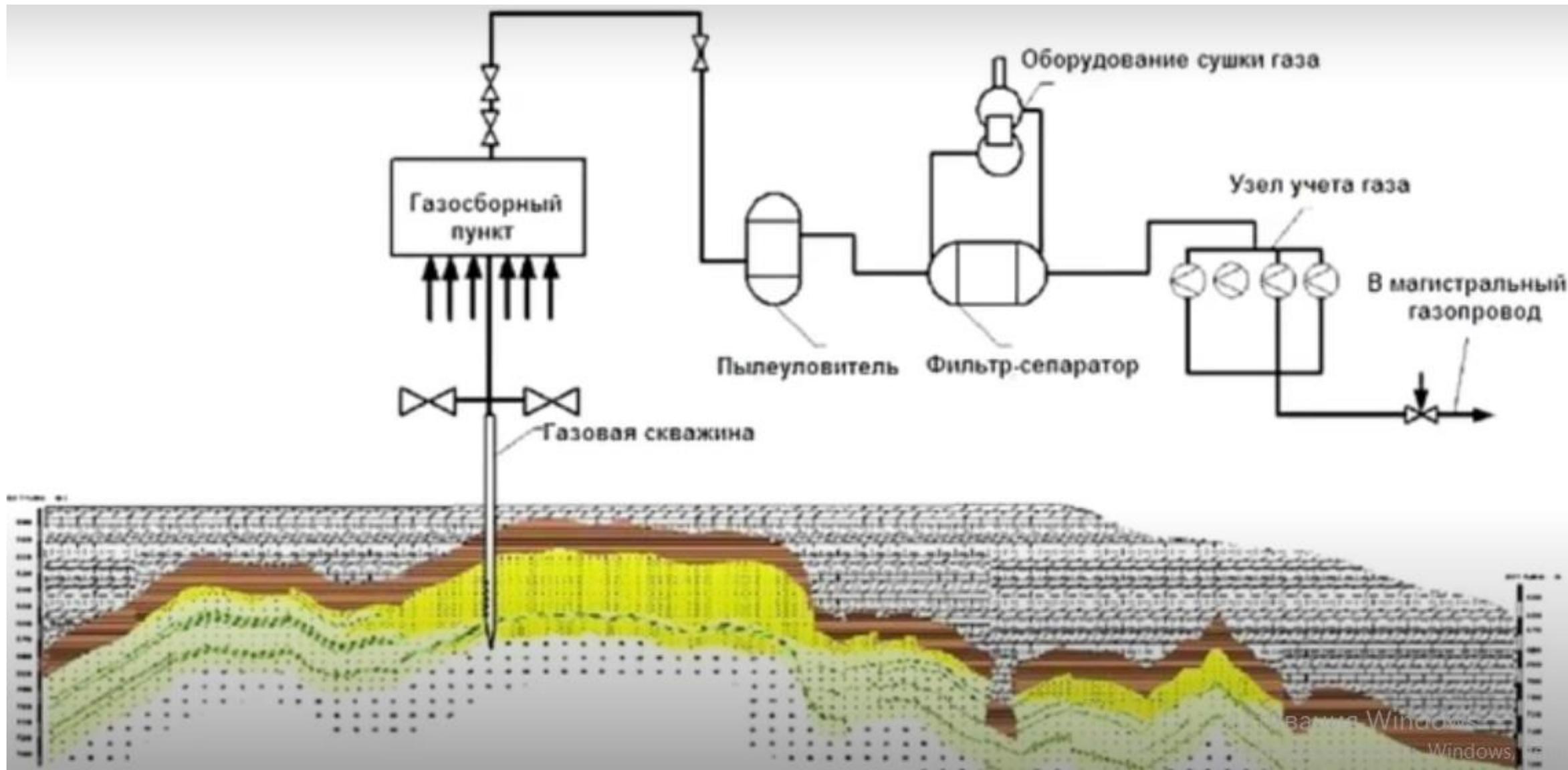
Принципиальная схема ПХГ в водоносном горизонте

12 – отбор газа из ПХГ;
13 – сепараторы;
14 – станция осушки;
1 – МГ.

- ✓ В скважинах всегда присутствует давление, которого достаточно для отбора газа, в обход наличию компрессоров и насосов.
- ✓ При отборе это оборудование не требуется.



Принципиальная схема отбора газа



Осушка газа

Назначение: удаление влаги из природного газа с целью достижения требуемой точки росы. Может быть предусмотрена установка абсорбционной осушки природного газа с использованием **диэтиленгликоля (ДЭГ)**.



Установка осушки газа

Технологический режим работы ПХГ разделяется на три процесса

1. Закачка газа заключается в нагнетании его в искусственную газовую залежь при заданных технологическим проектом показателях. Газ из магистрального газопровода поступает на площадку очистки газа от мехпримесей, затем на пункт замера и учёта газа и далее в компрессорный цех, где компримируется и подаётся на газораспределительные пункты (ГСП) по коллекторам. На ГСП происходит разделение общего газового потока на технологические линии, к которым подключены шлейфы скважин. Обязка технологических линий позволяет произвести замер производительности каждой скважины, температуру и давление газа при закачке.

2. Процесс хранения включает системный технологический, геологический и экологический контроль за объектом хранения газа и созданными производственными фондами.

Технологический режим работы ПХГ разделяется на три процесса

3. **Отбор газа** из подземного хранилища является практически таким же технологическим процессом, как и **добыча газа из газовых месторождений**, отличие – весь активный (товарный) газ отбирается за **период 60 ÷ 180 сут.**

Проходя по шлейфам, газ поступает на газосборные пункты, где собирается в газосборный коллектор. Из газосборных коллекторов газ поступает на площадку сепарации для отделения пластовой воды и мехпримесей, после чего направляется на площадку очистки и осушки газа, где происходят **улавливание капельной жидкости в пылеуловителях, абсорбционная осушка** или **низкотемпературная сепарация**. Очищенный и осушённый газ поступает в магистральные газопроводы.

Сложность эксплуатации ПХГ:

неоднородность литологического строения и физических свойств пласта-коллектора, от которых во многом зависят характер замещения газа водой, неравномерность отбора газа по площади, наличие в продукции скважин пластовой воды и частиц породы, возникновение гидратов в газопроводах и местах сопротивления (узел редуцирования, запорная арматура) и многое другое.

Процесс циклической эксплуатации ПХГ

Гистерезисная (p/Z-V) диаграмма - зависимость объёма (или массы) газа, находящегося в ПХГ к текущему моменту времени, от приведённого давления газа в газовой полости ПХГ.

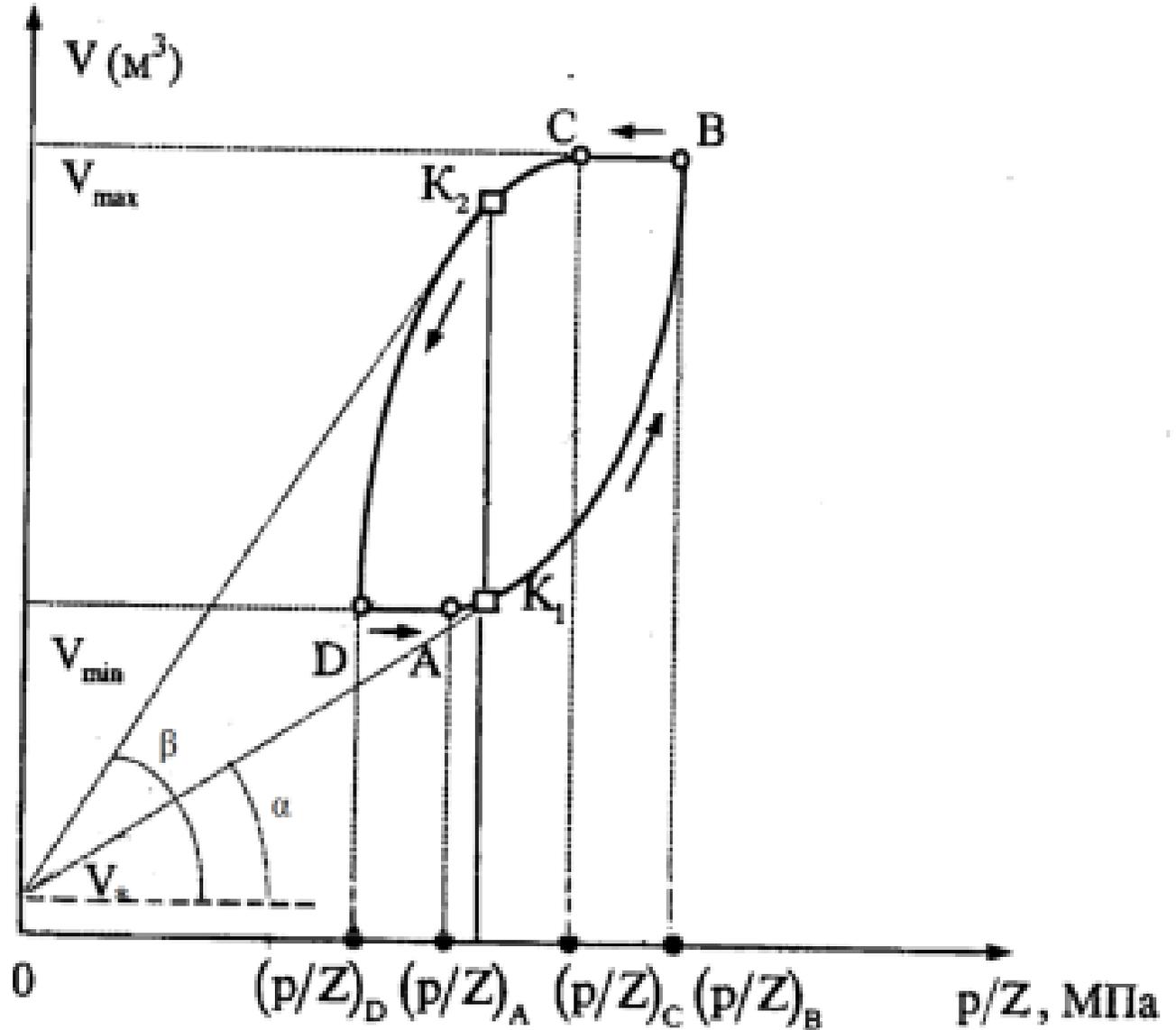
Z – коэффициент сверхсжимаемости.

точка A: закачка газа в ПХГ при минимальном объёме газа и приведённом давлении (p/Z)_A ;

объём газа возрастает, приведённое давление увеличивается до (p/Z)_B;

максимальное значения объёма газа в ПХГ V_{max};

Объём активного газа равен V_{max} – V_{min}.



Гистерезисная (p/Z-V) – диаграмма

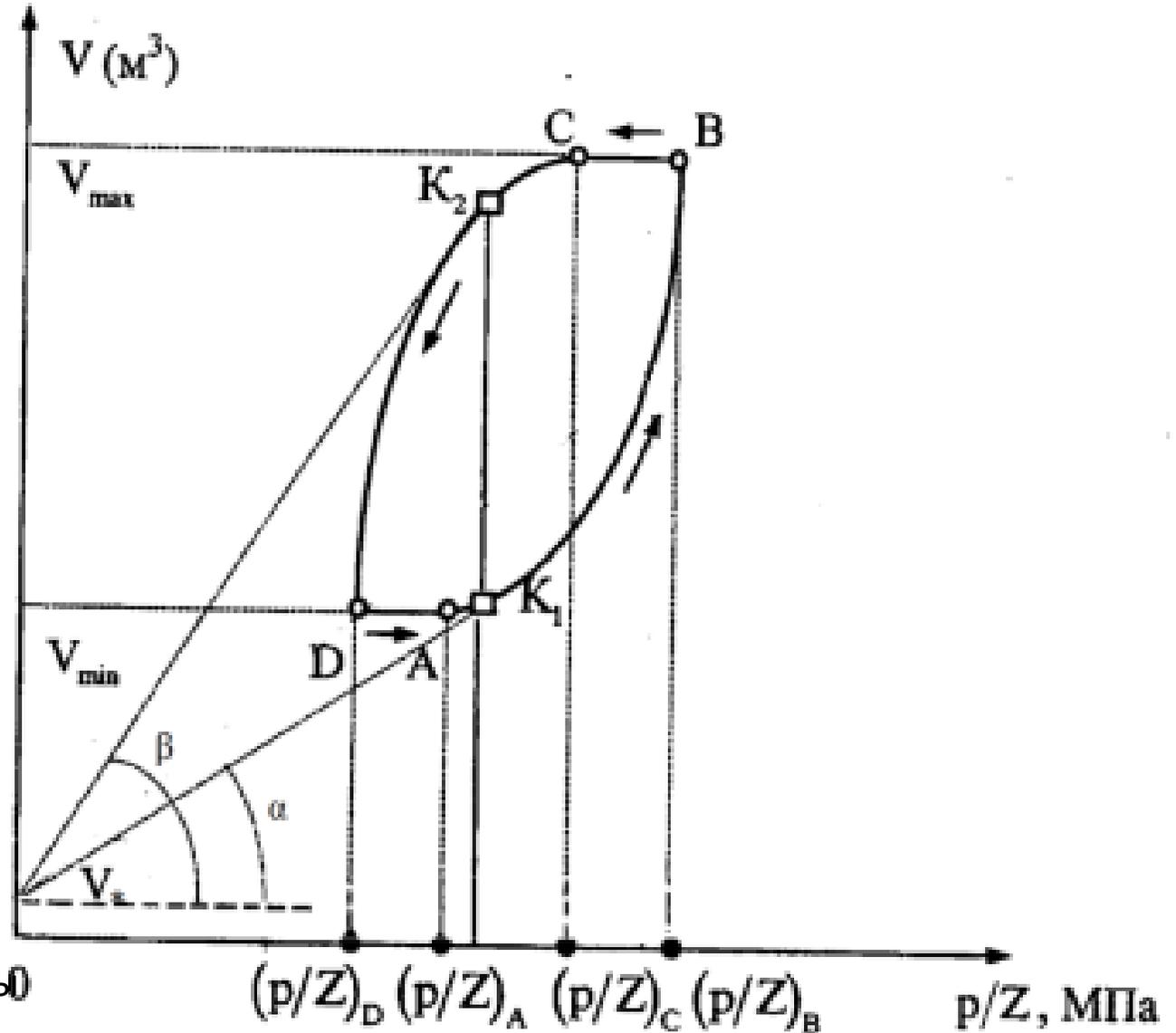
Процесс циклической эксплуатации ПХГ

отрезок BC: кратковременный простой хранилища в межсезонном промежутке – объём газа не изменяется, а приведённое давление уменьшается до значения $(p/Z)_C$.

CD: отбор газа из ПХГ – объём газа уменьшается до значения V_{min} , а приведённое давление падает до $(p/Z)_D$.

отрезок DA: второй простой хранилища – объём газа остаётся прежним, но приведённое давление увеличивается (условно до первоначального значения $(p/Z)_A$).

Если затем на оси ординат найти такую точку, что касательные, проведённые из неё к гистерезисной диаграмме, имеют в точках K_1 и K_2 касания одинаковую абсциссу $(p/Z)_K$, то ордината найденной точки V^* даёт потерю буферного газа в этом хранилище за период, предшествующий рассматриваемому моменту, а тангенсы углов α и β наклона касательных характеризуют минимальное и максимальное значения газонасыщенного порового объёма соответственно.



Гистерезисная $(p/Z-V)$ – диаграмма

На стадии эксплуатации ПХГ:

- ✓ технической частью работ на основных производственных объектах руководит **главный инженер** (технический руководитель),
- ✓ геолого-промысловой частью – **главный геолог**.

При эксплуатации ПХГ:

1 раз в пять лет проводят **геолого-технологическое обследование** (аудит) оценки эффективности функционирования наземного обустройства и герметичности ПХГ (шлейфов скважин, установок очистки, оценки газа, КС и др.);

по результатам геолого-технологического обследования (аудита) наземного обустройства **разрабатывают:**

- рекомендации по совершенствованию технологии и эксплуатации основных элементов наземного обустройства, их автоматизации;
- заключение о необходимости реконструкции наземного обустройства и модернизации объекта с целью замены устаревшего оборудования.

На стадии эксплуатации ПХГ:

- ✓ Сведения о проведённых **ремонтах, освидетельствованиях, диагностических обследованиях** вносятся в технические **паспорта** (эксплуатационные формуляры) технических устройств.
- ✓ Сведения о результатах периодических диагностических обследований, проведённых ремонтах, техническом перевооружении, реконструкциях трубопроводов и скважин вносятся в технические паспорта (эксплуатационные формуляры) трубопровода и дела (паспорта скважин).

Режим эксплуатации ПХГ устанавливается с учётом следующих условий:

- ✓ предупреждение образования гидратов и солей в призабойной зоне пласта, колоннах лифтовых труб, трубопроводах, наземном оборудовании;
- ✓ предупреждение преждевременного износа скважинного оборудования, трубопроводов, наземного оборудования вследствие наличия в продукции скважин механических примесей и коррозионно-активных компонентов;
- ✓ предупреждение нарушения герметичности объекта хранения;
- ✓ сохранение фильтрационно-ёмкостных свойств и производительности объекта хранения.

Баланс газа в ПХГ ведётся **на основе фактических замеров расхода газа на пункте замера расхода газа** с учётом собственных технических нужд и включает следующие действия:

- ✓ оценку затрат газа на собственные технические (технологические) нужды;
- ✓ расчёт объёма закачанного (отобранного) газа за сутки, месяц, сезон с учётом собственных технических нужд;
- ✓ расчёт общего объёма газа ПХГ.

Если на ОПО ПХГ эксплуатируется **несколько объектов хранения**, то баланс газа ведётся как в целом по ОПО ПХГ, так и по каждому объекту хранения отдельно.

Работу хранилища характеризует

- ✓ **Объемный параметр:** ёмкость хранилища – активный и буферный объемы газа
 - ✓ **Активный объем**
 - ✓ **Буферный объем**
- ✓ **Мощностный параметр:** суточная производительность при отборе (продолжительность работы хранилища при максимальной производительности)

Активный газ – объем газа в пласте коллекторе ПХГ, отбираемый из залежи при эксплуатации ПХГ в период потребности (зависит от геометрических размеров хранилища, формы и глубины залегания, пористости и проницаемости вмещающих ГП, t_{\min} и t_{\max} давления ПХГ при эксплуатации, технологии закачек и отборов газа)

- ✓ На **стадии проектирования** объем активного газа рассчитывается теоретическим путем
- ✓ На **стадии эксплуатации** корректируется по фактическим показателям хранилища

Буферный газ – минимально необходимый технологический объем газа. Не подлежащий отбору и находящийся в ПХГ для обеспечения его стабильной работы

ПХГ в истощенных газовых и газоконденсатных месторождениях

Преимущества:

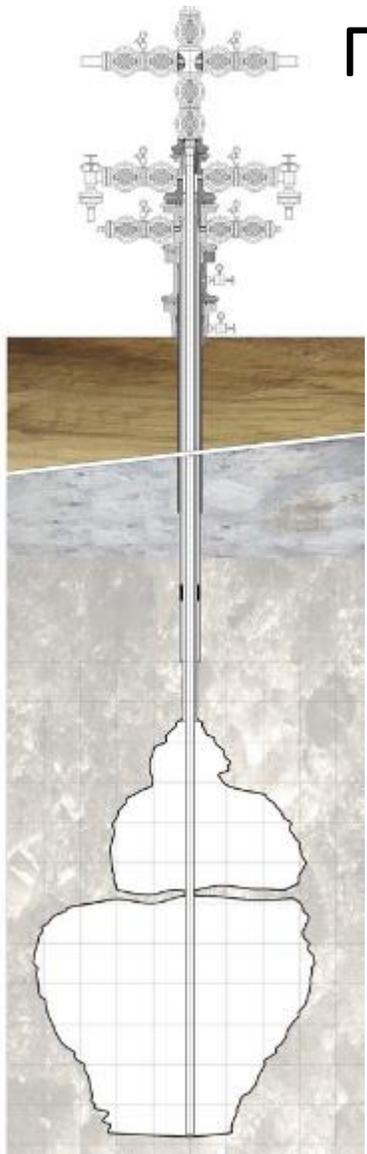
- ✓ месторождение полностью разведано
- ✓ известны геометрические размеры и форма площади газоносности, геолого-физические параметры пласта, начальные давления и температура, состав газа, изменение во времени дебитов скважин, режим разработки месторождения, технологический режим эксплуатации, герметичность покрышки
- ✓ на месторождении имеется определенный фонд добывающих, нагнетательных и наблюдательных скважин, промышленные сооружения для получения товарного газа

ПХГ в истощенных газовых и газоконденсатных месторождениях

При проектировании определяют:

- 1) максимально допустимое давление
- 2) минимально необходимое давление в конце периода отбора
- 3) объемы активного и буферного газов
- 4) число нагнетательно-эксплуатационных скважин
- 5) диаметр и толщину стенок промысловых и соединительного газопроводов
- 6) тип компрессорного агрегата для КС
- 7) общую мощность КС
- 8) тип и размер оборудования подземного хранилища для очистки газа от твердых взвесей при закачке его в пласт и осушки при отборе
- 9) объем дополнительных капитальных вложений, себестоимость хранения газа, срок окупаемости дополнительных капитальных вложений.

ПХГ в отложениях каменной соли



Профильный
разрез резервуара
1Т Волгоградского
ПХГ

Применяют два метода размыва:

1. **Циркуляционный** – путем закачки пресной или слабо минерализованной воды и выдавливания на поверхность насыщенного рассола (закачку и отбор проводят через одну, две или несколько скважин).

Каменная соль хорошо растворяется в пресной воде. Так, при 20 °С в 1 м³ воды может раствориться 358 кг соли. Для образования 1 м³ емкости в среднем требуется 6 – 7 м³ воды.

2. **Струйный (или орошение)**, когда размыв проводят при помощи струи воды, направляемой на соляные отложения (стенку-камеры) в не заполненном жидкостью пространстве с подачей рассола на поверхность погружными насосами или путем вытеснения его сжатым воздухом.

ПХГ в отложениях каменной соли

- ✓ Наиболее прочные и устойчивые формы горных выработок – **сфероидальные или сводчатые емкости**
- ✓ Для создания подземных емкостей заданной формы и размеров разработаны специальные процессы размыва с применением и без применения нерастворителя – жидкого или газообразного продукта, который легче воды и химически нейтрален к соли и ее водным растворам. В качестве жидких нерастворителей используют нефть, керосин, дизельное топливо, сжиженный газ, газообразные нерастворители: воздух, природный газ, инертные газы (CO₂ и др.)
- ✓ Управление процессом размыва осуществляется путем изменения положения концов колонны труб, направления и скорости потоков растворителя, регулирования концентрации рассола на входе и выходе из емкости, перемещения контакта рассол – нерастворитель, а также интенсификацией растворимости соли