

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И КОНТРОЛЯ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ УГЛЕВОДОРОДОВ

Оригинальная статья

УДК 622.691.24

EDN: UWZCWA

Влияние параметров ловушки на компактность газонасыщенной области многокупольного подземного хранилища газа в водоносном пласте

М.Л. Непомнящий, М.П. Хайдина ✉

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 65, корп. 1

Аннотация. *Введение.* В настоящее время в исследовании влияния геометрических и фильтрационных параметров на формирование газонасыщенной области при создании и эксплуатации подземных хранилищ газа отсутствует комплексный количественный критерий, позволяющий сравнить компактность газонасыщенной области при разных сценариях закачки и различных геометрических параметрах ловушек. *Цель работы.* Изучение влияния фильтрационно-емкостных и геометрических параметров ловушек со сводовой структурой на компактность газонасыщенной области при создании двухкупольного подземного хранилища газа в водоносном пласте. *Материалы и методы.* Все рисунки и численные значения, представленные в работе, получены в результате трехмерного гидродинамического моделирования с использованием программного комплекса tNavigator. Для количественной оценки компактности залежи авторами введен коэффициент геометрической эффективности. *Результаты.* На основе трехмерного гидродинамического моделирования установлено, что наличие второго купола приводит к асимметрии газонасыщенной области относительно центра куполообразной ловушки. Показано, что при одновременной эксплуатации куполов в двухкупольной системе увеличение амплитуды куполов и проницаемости пласта способствует росту компактности, в то время как снижение коэффициента анизотропии проницаемости приводит к увеличению площади растекания газа и снижению коэффициента геометрической эффективности. Выявлено, что при закачке одинакового количества газа в ловушки равного объема, но разной амплитуды, компактность газонасыщенной области в высокоамплитудном куполе существенно выше, чем в низкоамплитудном. Установлено, что влияние расстояния между куполами при одновременной закачке газа в двухкупольную систему в рассмотренном диапазоне 500–1500 м является незначительным. *Заключение.* Полученные результаты позволили определить факторы, влияющие на компактность газонасыщенной области двухкупольного подземного хранилища газа, что создает предпосылки для разработки критериев оптимизации, направленных на формирование компактной искусственной газовой залежи.

Ключевые слова: влияние параметров ловушки; газонасыщенность; компактность газонасыщенной области; подземное хранение газа; многокупольное подземное хранилище газа; водоносный пласт; гидродинамическое моделирование; асимметрия

Финансирование: источники финансирования отсутствовали.

✉ Хайдина Мария Павловна, khaydina.m@gubkin.ru

© Непомнящий М.Л., Хайдина М.П., 2026



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Непомнящий М.Л., Хайдина М.П. Влияние параметров ловушки на компактность газонасыщенной области многокупольного подземного хранилища газа в водоносном пласте // Актуальные проблемы нефти и газа. 2026. Т. 17, № 3. С. 440–460. EDN: UWZCWA

Введение

В России эксплуатируется семь подземных хранилищ газа (ПХГ), созданных в водоносных пластах. За исключением одного – Касимовского ПХГ – все эти объекты представляют собой не одиночные ловушки, а системы из нескольких гидродинамически связанных куполов, различающихся по форме и размерам [1]. Характеристики геологических структур ПХГ приведены в табл. 1. Углы наклона поверхностей, формирующих геометрию ловушки, меняются в пределах 0,5–17 град. Для каждого объекта характерна вариативность значений ввиду различий природных условий формирования геологических структур и несимметричности ловушек. Анализ распределения газонасыщенности в таких ловушках при создании и эксплуатации

ПХГ усложнен многими факторами: неоднородностью коллекторов, изменчивостью фациального состава, различиями в интервалах вскрытия продуктивного пласта скважинами. В результате влияния интерференции репрессионных воронок при закачке газа контур газонасыщенной области многокупольных систем (если принять, что все ловушки правильной округлой формы) отклоняется от симметричной, характерной для структуры с одним куполом, формы. Степень и характер отклонений определяются неоднородностью фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллектора, неравномерной по площади активностью водонапорного бассейна и геометрическими параметрами ловушек (амплитудой куполов, углом наклона пласта, расстоянием между куполами).

Табл. 1. Характеристики геологических структур ПХГ России в водоносных пластах

Table 1. Characteristics of geological structures of Russian UGS facilities in aquifers

	Условное название реального объекта	Количество купольных поднятий (куполов) геологической структуры, занятой хранилищем, влияющее на эксплуатацию объекта, ед.	Амплитуды куполов, м
1	ПХГ1	1	74
2	ПХГ2	2	33,5 и 15
3	ПХГ3	2	94 и 37
4	ПХГ4	2	23 и 31
5	ПХГ5	5	от 6 до 25
6	ПХГ6	2	до 7
7	ПХГ7	4	до 112

Вопросы влияния геометрических и фильтрационных параметров на формирование газонасыщенной области при

создании и эксплуатации ПХГ рассматривались в большом количестве научных работ.

В трудах Левыкина Е.В. [2] и Гусева Э.Л.¹ на основе аналитических уравнений и балансовой модели разработана методика расчета формы газовой контактной (ГВК). Проблемы формирования газонасыщенной области в малоамплитудных ловушках рассмотрены в работах Михайловского А.А. [3, 4]. В работах Григорьева А.В. предложены приближенные методики расчета формы контакта и движения поверхности ГВК при закачке газа в мощные водоносные пласты. Влияние неоднородности ФЕС на распространение газа и использование порового объема ловушки исследовалось в работах Хана С.А., Фейзуллаева А.А. [5, 6], Хайдиной М.П. [7, 8], а также Михайловского А.А. и Уколова А.В. Неоднородность коллекторских свойств является одним из ключевых факторов, определяющих распределение газа в пласте и эффективность использования его емкости. Значительное внимание в научной литературе уделено эффекту гистерезиса относительной фазовой проницаемости. В работах Михайловского А.А. [9], Троицкого В.М. [10], Поповича А.П. [11], а также Гао У. [12] изучено влияние гистерезиса относительных фазовых проницаемостей (ОФП) на перераспределение газа в пласте при циклической эксплуатации, показано его существенное влияние на подвижность газа и оценку объема газа в хранилище. Ряд исследований посвящен влиянию угла наклона пласта на распространение газа. В работах Гайсина А.Р. [13, 14], Амшинова Л.М. [15] Мулявина С.Ф. [16] показано, что увеличение угла

падения пласта приводит к линейному росту удельного объема газа, распространяющегося в водоносную область. Исследования Мельникова Е.А. [17], Колодяжного И.А. [18], Затолкиной И.Г. [19] посвящены циклической эксплуатации ПХГ в водоносном пласте. Воронов С.А. [20] приводит параметрические исследования влияния структурных и гидродинамических характеристик многокупольного водоносного пласта на основные технологические показатели многозалежных ПХГ с единой водонапорной системой. Также стоит отметить работу [21], в которой впервые поднимается проблема создания многокупольных ПХГ.

Во многих перечисленных работах авторы говорят о важности компактного заполнения ловушки газом, однако ни в одной из них не дается четкого определения, что именно следует понимать под компактной газонасыщенной областью. Наиболее близким подходом с точки зрения описания компактности газонасыщенной области является предложенный Э.Л. Гусевым коэффициент использования ловушки λ , который численно выражается как отношение объема пор в пласте, занятых газом, к объему ловушки, заключенному над горизонтальной поверхностью, проведенной через точку контакта на кровле пласта. Однако в реальных условиях из-за неоднородности ФЕС ГВК будет иметь разные отметки в разных точках кровли. Поэтому геологи и промысловики на практике отходят от определения Э.Л. Гусева и используют объемный метод, где объем ловушки рассчитывается не до точки на кровле, а до замыкающей изогипсы.

¹ Бузинов С.Н., Гусев Э.Л., Сухарев М.Г., Шеберстов Е.В. Методические рекомендации по расчету формы контакта газ – вода при создании подземных хранилищ газа в водоносных пластах. М.: ВНИИГАЗ, 1981. 78 с.

В таких условиях при одинаковом количестве закачанного газа две принципиально разные формы газонасыщенной области (большая площадь и маленькая толщина или большая толщина и маленькая площадь) могут давать одинаковые значения λ , что делает этот коэффициент непригодным для оценки компактности. Таким образом, отсутствует комплексный количественный критерий, позволяющий сравнивать компактность газонасыщенной области при разных сценариях закачки и различных геометрических параметрах ловушек.

Цель настоящей работы – изучить влияние фильтрационно-емкостных и геометрических параметров ловушек на форму и компактность газонасыщенной области при создании двухкупольного ПХГ в водоносном пласте, где эксплуатируются оба купола.

Рассматриваются следующие параметры ловушек: амплитуды куполов, углы наклона пластов, проницаемость пласта, расстояния между куполами, анизотропия проницаемости.

Под компактностью газонасыщенной области мы понимаем характеристику распределения закачанного газа в пределах структурной ловушки.

Материалы и методы

Для оценки компактности полученной газонасыщенной области вводится коэффициент геометрической эффективности – $K_{эф}$. Предлагаемый коэффициент служит количественной оценкой эффективности компактного заполнения ловушки газом. Максимуму коэффициента геометрической эффективности соответствует такое распределение газа в пространстве ловушки, при котором объем газа максимально оттесняет

воду по толщине пласта и минимально растекается по кровле пласта. Коэффициент геометрической эффективности определяется по формуле:

$$K_{эф} = \frac{(H/H_0)}{(S/S_0)},$$

где H – средняя газонасыщенная толщина пласта с газонасыщенностью выше принятой пороговой;

H_0 – средняя толщина пласта;

S – площадь кровли над газонасыщенной областью с газонасыщенностью выше принятой пороговой;

S_0 – площадь кровли в пределах замыкающей изогипсы (естественной границы ловушки).

Естественной границей ловушки является замыкающая изогипса – замкнутая линия, за пределами которой структура переходит в моноклираль или синклираль. Выход газа за пределы замыкающей изогипсы заведомо снижает компактность, так как сопровождается неконтролируемым распределением газонасыщенной области по объему пласта.

При оценке достигаемой компактности при закачивании различных объемов газа используется нормированный коэффициент, учитывающий долю закачанного газа, оставшегося в пределах замыкающей изогипсы (далее – ловушки):

$$\overline{K_{эф}} = \frac{V_3 - V_B}{V_0} \cdot K_{эф},$$

где V_3 – объем закачиваемого в ловушку газа;

V_B – объем вышедшего за пределы замыкающей изогипсы газа;

V_0 – объем полностью заполненной газом ловушки при начальном пластовом давлении.

Рисунки и численные значения, представленные в работе, получены в результате трехмерного гидродинамического моделирования с использованием программного комплекса tNavigator (разработчик – Rock Flow Dynamics). Данный программный комплекс представляет собой интегрированную платформу для геологического и гидродинамического моделирования нефтегазовых месторождений. Рассматриваются однокупольная и двухкупольная структуры. Купола имеют правильную геометрическую форму (сегменты сферы). За пределами куполов пласт сформирован горизонтальной плоскостью, которая является границей ловушки. Система пластовая, толщина пласта во всех моделях составляет 20 м. Начальное пластовое давление принято 14,2 МПа. Для моделирования водонапорной системы к боковым границам моделей подключен аквифер. Пористость в моделях задана 0,23 д. ед. Пласт принят однородным по пористости и проницаемости, что позволяет при варьировании любого из исследуемых параметров получить распределение газонасыщенности, обусловленное исключительно этим фактором, а не влиянием неоднородности. Закачка газа в каждую ловушку велась через одиночную скважину, расположенную в центре купола, что

обеспечивает симметричное распределение газонасыщенности в куполе и исключает дополнительное смещение газонасыщенной области при другом размещении скважин. Состав закачиваемого газа – 100 %-й метан.

Результаты и обсуждение

Влияние второго купола на компактность газонасыщенной области

Исследуется форма и компактность газонасыщенной области при создании двухкупольного ПХГ в водоносном пласте с идентичными по геометрической форме ловушками. Оценка полученных показателей осуществляется относительно эталонной модели – изолированной однокупольной структуры такой же геометрической формы. Форма куполов геометрически симметрична и представляет собой сегмент сферы. Пласт вне куполов залегает горизонтально на глубине 1000 м, амплитуда куполов – 80 м. Газ в ловушки закачивается с одинаковым темпом и ограничением по максимальной приемистости 200 000 м³/сут, ограничением по максимальному забойному давлению – 170 атм до достижения одинакового объема – 230 млн м³. Результаты расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 1.

Табл. 2. Результаты расчетов при создании ПХГ в однокупольной и двухкупольной структурах

Table 2. Calculation results for the creation of UGS facilities in single-dome and double-dome structures

Вариант	Однокупольная структура	Купол в двухкупольной структуре
Среднее давление в куполе на конец закачки, атм	162,9	169,9
Закачанный объем газа, млн м ³	230	230
Срок закачки, сут	1155	1445
$K_{эф}$	0,99	1,23

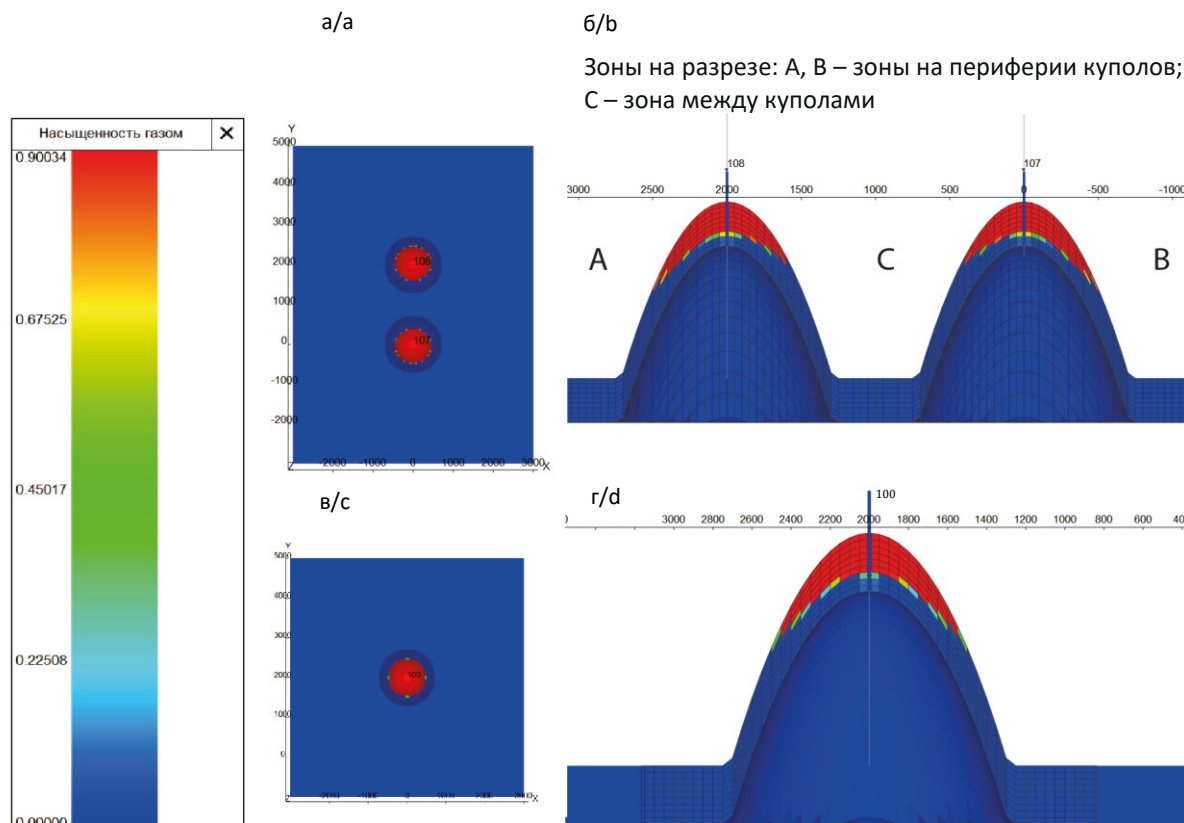


Рис. 1. Распределение газонасыщенности на конец расчета:
в двухкупольной структуре: а – на плане (вид сверху); б – на разрезе;
в единичном куполе: в – на плане (вид сверху); г – на разрезе

Fig. 1. Distribution of gas saturation at the end of the calculation:
in a two-dome structure: а – on the plan (top view); б – in the cross-section;
in a single dome: в – on the plan (top view); г – in the cross-section

Из рис. 1 видно, что в двухкупольной структуре, в отличие от симметричного распределения газа в единичном куполе от центральной нагнетательной скважины в крыльевые части, происходит смещение линии ГВК в сторону от зоны между куполами (точки А и В). Причина смещения контура газонасыщенности заключается в образовании зоны повышенного давления в области между куполами, которая выступает в роли динамического барьера, ухудшающего фильтрацию газа в эту сторону. Повышенное давление в межкупольной зоне (точка С) обусловлено интерференцией репрессивных воронок. Контур распределения газонасыщенности по площади в обоих куполах ПХГ принимает форму эллипса, вытянутого

вдоль оси, соединяющей центры куполов, в сторону меньшего давления (в сторону точек А и В). Отмечается, что асимметрия в распределении газонасыщенности в куполах возникает уже в начале процесса закачки (после первых расчетных шагов).

Таким образом, при сравнении отдельного купола, входящего в состав двухкупольной системы, с изолированным куполом той же геометрии, установлено что наличие второго купола приводит к асимметрии газонасыщенной области. Также отмечается что гидродинамическое взаимодействие с соседним куполом позволяет сформировать более компактную газонасыщенную область при более высоком пластовом давлении.

Влияние амплитуд куполов на компактность газонасыщенной области

Для изучения влияния амплитуды куполов на компактность газонасыщенной области при создании ПХГ в водоносном пласте рассмотрена закачка одинаковых

объемов газа в 4 одиночные купольные структуры. Параметры ловушки (амплитуда и радиус окружности купола) подобраны так, чтобы объем куполов был одинаковый. Закачка газа проводилась с постоянным темпом. Геометрические параметры куполов представлены в табл. 3.

Табл. 3. Геометрические параметры одиночных куполов

Table 3. Geometric parameters of single domes

Амплитуда, м	Радиус купола, м (угол наклона пласта, град)	Толщина пласта, м	Объем, млн м ³
100	495 (11,3)	20	365,75
80	500 (9)		
60	515 (6,5)		
40	542,5 (4,2)		

Зависимость коэффициента геометрической эффективности, площади и средней газонасыщенной толщины газонасыщенной области от объема закачки для куполов с разной амплитудой представлена на рис. 2 и в табл. 4. Из табл. 4 видно, что при уменьшении амплитуды купола увеличивается площадь газонасыщенной области и уменьшается средняя газонасыщенная толщина. Таким образом, при закачке одинаковых объемов

газа в купол большей амплитуды газонасыщенная область формируется более компактно, чем при закачке в купол меньшей амплитуды (рис. 3). Снижение $K_{эф}$ в варианте с закачкой 256 млн м³ в купол амплитудой 40 м обусловлена выходом газа за границы ловушки, что приводит к резкому увеличению площади газонасыщенной области и уменьшению средней газонасыщенной толщины.

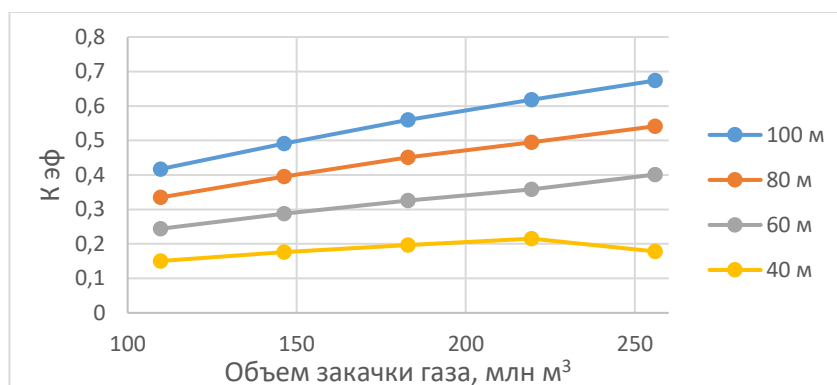


Рис. 2. Зависимость коэффициента геометрической эффективности от объема закачки для куполов с амплитудой 40–100 м

Fig. 2. Dependence of the geometric efficiency coefficient on the injection volume for domes with an amplitude of 40–100 m

Табл. 4. Результаты расчетов для куполов с разной амплитудой**Table 4.** Calculation results for domes with different amplitudes

Амплитуда, м	Объем закачанного газа, млн м ³	Газонасыщенная площадь, усл. ед.	Средняя газонасыщенная толщина, м	$K_{эф}$
100	109,72	2944	10,71	0,417
	146,32	3552	11,41	0,491
	182,89	4093	11,98	0,559
	219,39	4612	12,44	0,618
	256,07	5088	12,81	0,674
80	109,72	3308	9,45	0,335
	146,32	3996	10,11	0,395
	182,89	4612	10,65	0,451
	219,39	5205	10,99	0,495
	256,07	5714	11,31	0,541
60	109,72	3972	7,87	0,244
	146,32	4792	8,39	0,287
	182,89	5544	8,80	0,326
	219,39	6264	9,12	0,359
	256,07	6940	9,36	0,401
40	109,72	5292	5,89	0,150
	146,32	6416	6,27	0,176
	182,89	7492	6,53	0,196
	219,39	8477	6,75	0,215
	256,07	10832	6,23	0,178

Далее рассматривается распределение газонасыщенности в многокупольной системе, где одновременно эксплуатируются два купола с разной амплитудой. На рис. 4 проиллюстрировано распределение газонасыщенности при закачке 182 млн м³ газа в каждый купол двухкупольной структуры, состоящей из равных по объему ловушек амплитудой 100 и 40 м. Из рис. 4 видно, что газонасыщенная область в куполе с амплитудой 40 м справа вплотную подходит к границе

ловушки, в то время как в куполе с амплитудой 100 м расстояние от ГВК до левой границы купола составляет по горизонтали около 45 м. $K_{эф}$ для купола амплитудой 100 м – 0,59, $K_{эф}$ для купола амплитудой 40 м – 0,208. Дальнейшее увеличение закачки газа в один из куполов может привести к выходу газа за пределы ловушки в правом куполе. Таким образом, соотношение амплитуд куполов имеет важное значение при расчете объемов закачки газа между куполами.

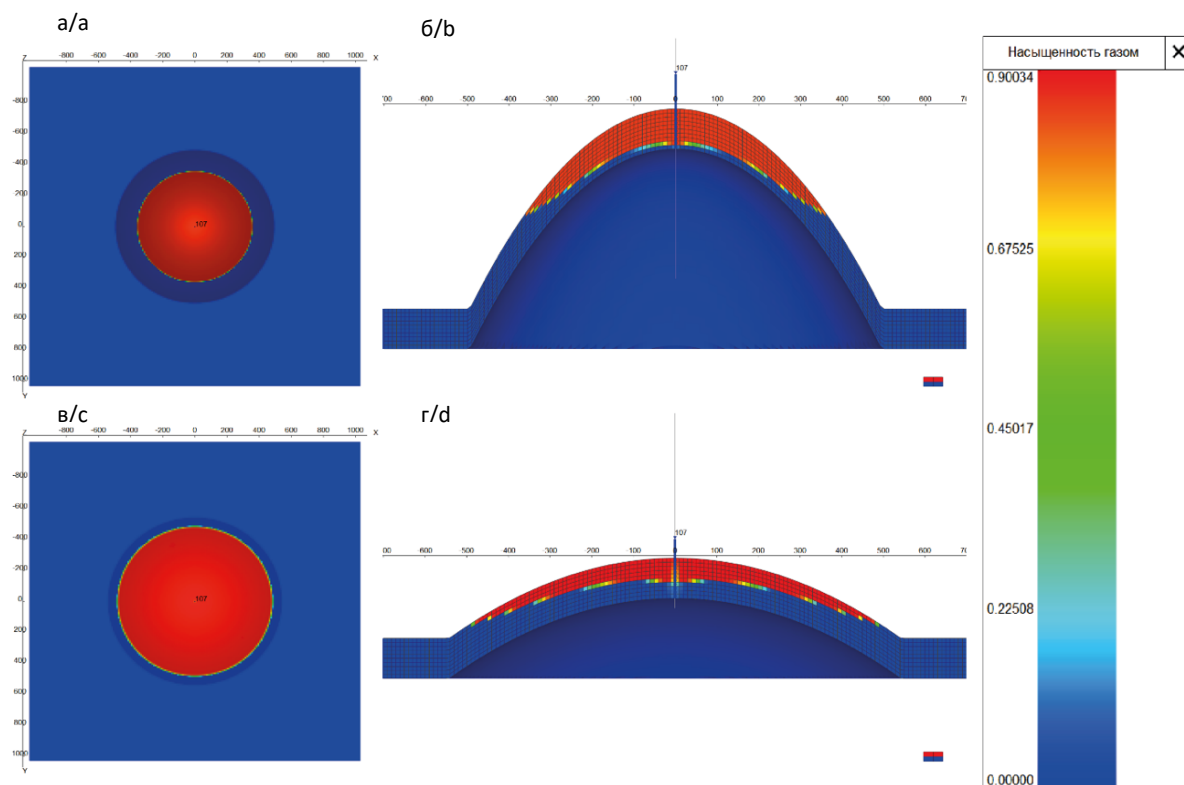


Рис. 3. Распределение газонасыщенности на момент закачки 182 млн м^3 газа в куполах с амплитудой 100 м: а – на плане (вид сверху); б – на разрезе; с амплитудой 40 м: в – на плане (вид сверху); г – на разрезе

Fig. 3. Distribution of gas saturation at the time of injection of 182 million м^3 of gas in domes with an amplitude of 100 m: а – on the plan (top view); б – in the cross-section; with an amplitude of 40 m: с – on the plan (top view); д – in the cross-section

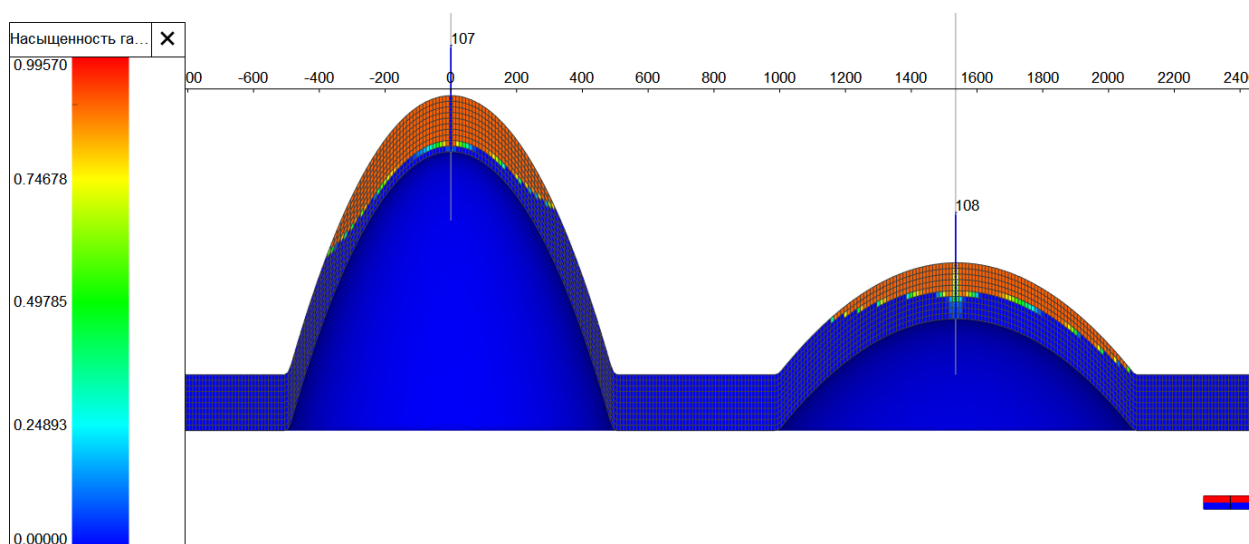


Рис. 4. Распределение газонасыщенности в двухкупольной системе с амплитудой куполов 100 и 40 м при закачке 182 млн м^3 газа в каждый купол

Fig. 4. Distribution of gas saturation in a two-dome system with dome amplitudes of 100 and 40 m, when 182 million м^3 of gas are injected into each dome

Влияние проницаемости пласта на компактность газонасыщенной области

Рассмотрена система из двух одинаковых куполов, амплитудой 80 м, находящихся на расстоянии 500 м друг

от друга. В оба купола одновременно закачивается одинаковый объем газа, с постоянным темпом. Рассчитано 4 варианта с проницаемостью пласта 100, 200, 300 и 400 мД. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

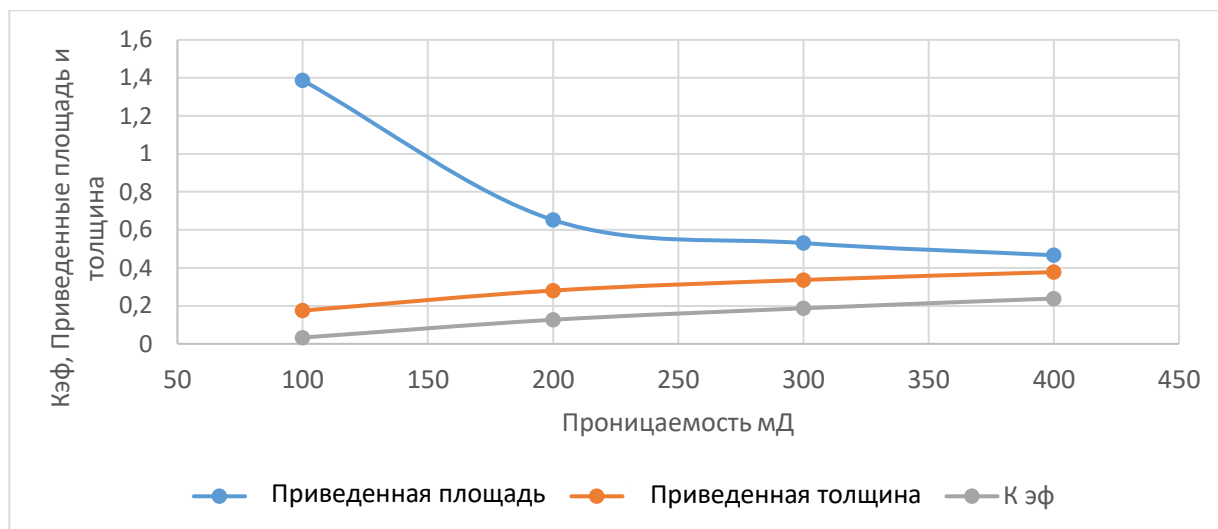


Рис. 5. Зависимость коэффициента геометрической эффективности, приведенной площади и приведенной толщины от проницаемости пласта

Fig. 5. Dependence of the geometric efficiency coefficient, the reduced area, and the reduced thickness on the reservoir permeability

Из рис. 5 видно, что при увеличении проницаемости пласта увеличивается компактность газонасыщенной области в каждом куполе двухкупольной системы. Это обусловлено тем, что при более низкой проницаемости пласта образуется большая воронка репрессии, что увеличивает разность давлений внутри купола и за его пределами от 5 до 20 атм и заставляет газ более активно двигаться в область низкого давления (рис. 6).

Влияние расстояния между куполами на компактность газонасыщенной области

Для оценки влияния расстояния между куполами на компактность газонасыщенной области рассмотрено 3 варианта закачки газа

в одинаковые купола амплитудой 100 м, находящиеся на расстоянии 500, 1000 и 1500 м друг от друга. Закачка газа в каждый купол начиналась одновременно и велась с одинаковым темпом. Результаты расчетов приведены в табл. 5 и на рис. 7.

Расчеты показали, что при увеличении расстояния между куполами их гидродинамическое взаимодействие уменьшается, что приводит к уменьшению давления в куполах и в области между ними. Чем меньше гидродинамическое взаимодействие между куполами, тем более симметрична форма газонасыщенной области относительно центра купола. Однако полученные значения $K_{эф}$ отличаются друг от друга незначительно (на 0,3 %).

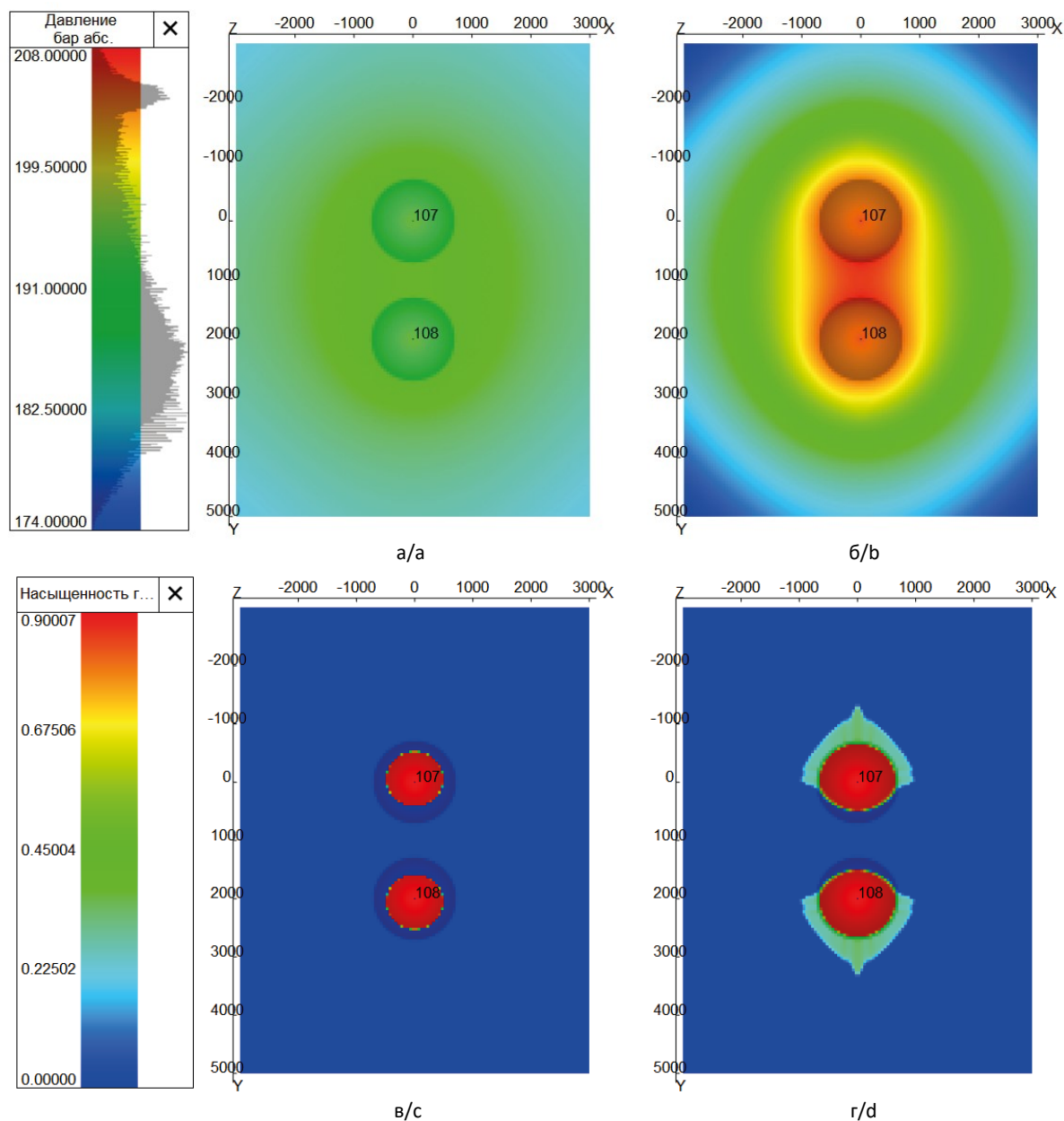


Рис. 6. Распределение давления в пластах с проницаемостью: а – 400 мД; б – 100 мД; распределение газонасыщенности в пластах с проницаемостью: в – 400 мД; г – 100 мД

Fig. 6. Pressure distribution in formations with permeability: а – 400 mD; б – 100 mD; gas saturation distribution in formations with permeability: в – 400 mD; г – 100 mD

Табл. 5. Результаты расчетов для разных расстояний между куполами

Table 5. The calculation results for different distances between the domes

Расстояние между куполами, м	Площадь газонасыщенной области, усл. ед.	Средняя газонасыщенная толщина, м	Объем закачки, млн м ³	$K_{эф}$
500	596	7,62	438	0,2474
1000	600	7,66	438	0,2471
1500	604	7,7	438	0,2467

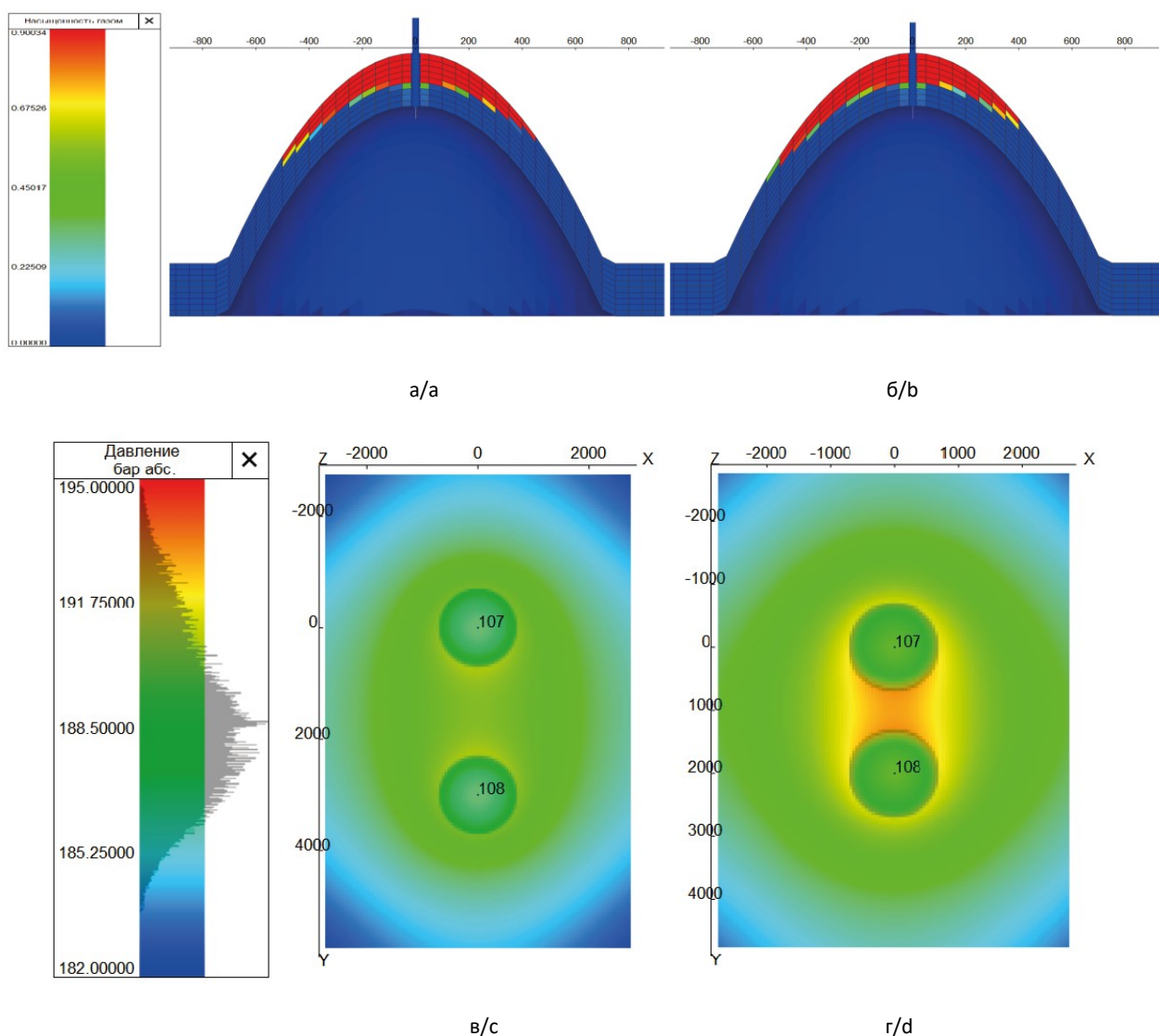


Рис. 7. Распределение газонасыщенности в пласте с расстоянием между куполами:
а – 1500 м; б – 500 м;
распределение давления в пластах с расстоянием между куполами:
в – 1500 м; г – 500 м

Fig. 7. Distribution of gas saturation in the reservoir with the distance between the domes:
а – 1500 м; б – 500 м;
distribution of pressure in the reservoirs with the distance between the domes:
с – 1500 м; д – 500 м

**Влияние анизотропии
проницаемости
на компактность
газонасыщенной области
при одновременной
эксплуатации двух куполов**

Рассмотрена одновременная закачка
одинакового объема газа в двухкупольную

систему с проницаемостью 300 мД и
коэффициентом анизотропии проницаемости
(отношение проницаемости по вертикали
к проницаемости по горизонтали), равным
1; 0,5 и 0,1. Темп закачки газа в каждый
купол одинаковый. Результаты расчетов
приведены в табл. 6 и на рис. 8.

Табл. 6. Результаты расчетов для разной анизотропии проницаемости**Table 6.** Calculation results for different anisotropies in permeability

Коэффициент анизотропии, д. ед.	Площадь газонасыщенной области, усл. ед.	Средняя газонасыщенная толщина, м	Объем закачки, млн м ³	$K_{эф}$
1	696	6,64	438	0,625
0,5	704	6,66	438	0,620
0,1	728	6,78	438	0,611

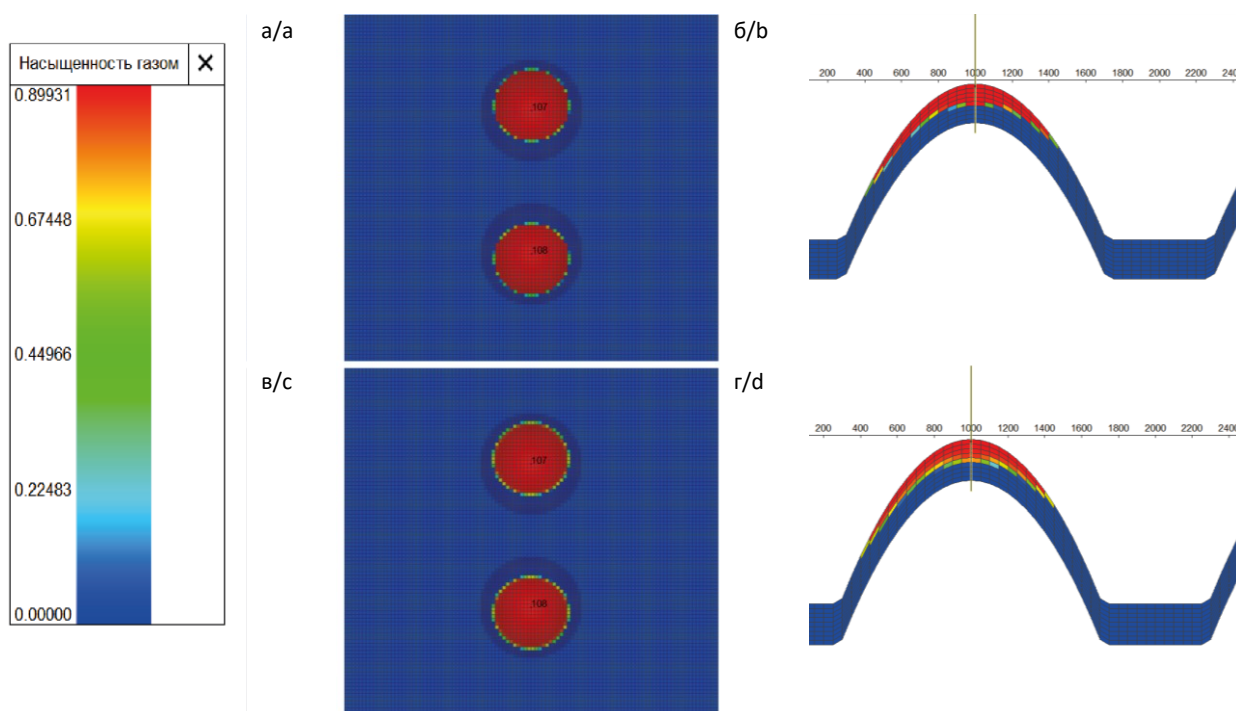


Рис. 8. Распределение газонасыщенности в пластах с коэффициентом анизотропии проницаемости, равном 1: а – на плане (вид сверху); б – в разрезе; с коэффициентом анизотропии проницаемости, равном 0,1: в – на плане (вид сверху); г – в разрезе

Fig. 8. Distribution of gas saturation in formations with anisotropy in permeability = 1: а – on the plan (top view); б – in the section; with anisotropy in permeability = 0.1: с – on the plan (top view); д – in the section

Из табл. 6 видно, что при снижении коэффициента анизотропии газ преимущественно распространяется в горизонтальном направлении, что приводит к увеличению площади растекания. Средняя газонасыщенная толщина при этом незначительно

возрастает (от 6,64 до 6,78 м), что связано с более интенсивным заполнением верхней части пласта. Однако увеличение площади перекрывает этот эффект, и в итоге коэффициент геометрической эффективности снижается от 0,625 до 0,611.

По результатам проведенных исследований влияния фильтрационно-емкостных и геометрических параметров ловушек на компактность газонасыщенной области при создании двухкупольного ПХГ в водоносном пласте со сводовой структурой было установлено следующее:

1. В отличие от симметричного распределения газа в ловушке с одиночным куполом, в двухкупольной системе возникает асимметрия из-за образования зоны повышенного давления между куполами.

2. При одинаковом объеме ловушки увеличение амплитуды купола приводит к росту коэффициента геометрической эффективности $K_{эф}$ и формированию более компактной газонасыщенной области. Соотношение амплитуд куполов является ключевым фактором при распределении объемов закачки между куполами. В двухкупольной системе с амплитудами 100 и 40 м при одновременной эксплуатации обоих куполов в низкоамплитудном куполе газонасыщенная область характеризуется большим растеканием и более низким значением $K_{эф}$ (0,208), тогда как в высокоамплитудном куполе компактность существенно выше ($K_{эф} = 0,59$).

3. Увеличение проницаемости от 100 до 400 мД способствует росту коэффициента геометрической эффективности $K_{эф}$ от 0,45 до 0,62, что связано с уменьшением воронки репрессии. При низкой проницаемости (100 мД) разность давлений внутри купола и за его пределами достигает 20 атм, тогда как при высокой проницаемости (400 мД) эта разность сокращается до 5 атм, что снижает латеральное растекание газа при одновременной эксплуатации куполов в многокупольной системе и способствует формированию более компактной газонасыщенной области.

4. Увеличение расстояния от 500 до 1500 м ослабляет гидродинамическое взаимодействие между куполами, что приводит к уменьшению давления в куполах и межкупольной области, а форма газонасыщенной области становится более симметричной. Однако количественное изменение $K_{эф}$ в этом диапазоне не превышает 0,3 %, что свидетельствует о незначительном влиянии расстояния между куполами на компактность газонасыщенной области по сравнению с ролью амплитуды куполов и проницаемости пласта.

5. При снижении коэффициента анизотропии проницаемости от 1 до 0,1 газ преимущественно распространяется в горизонтальном направлении, а средняя газонасыщенная толщина при этом незначительно возрастает от 6,64 до 6,78 м. Этот рост связан с более интенсивным заполнением газом верхней части пласта. Однако увеличение площади перекрывает этот эффект. В результате коэффициент геометрической эффективности снижается с 0,625 до 0,611.

Заключение

Полученные результаты позволили определить факторы, влияющие на характер и степень взаимного влияния эксплуатации двух куполов геологической ловушки ПХГ. Установлено, что решающую роль в формировании компактной газонасыщенной области играют амплитуда куполов и проницаемость пласта, тогда как расстояние между куполами и анизотропия проницаемости влияют существенно слабее. Полученные закономерности создают предпосылки для дальнейшей разработки критериев оптимизации показателей эксплуатации скважин, направленных на формирование компактной газонасыщенной области уже на этапе создания хранилища.

Вклад авторов

М.Л. Непомнящий – методология, формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание рукописи и ее редактирование.

М.П. Хайдина – администрирование проекта, концептуализация.

Все авторы одобрили окончательную версию публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование искусственного интеллекта

При написании текста статьи генеративные системы искусственного интеллекта не использовались.

Список источников

1. *Непомнящий М.Л., Хайдина М.П.* Формирование газонасыщенной области при создании двухкупольного подземного хранилища газа в водоносных пластах: сравнительный анализ и критерий эффективности // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса 2026. № 4(154). С. 30–36. EDN: MVZDXI
2. *Левыкин Е.В.* Технологическое проектирование хранения газа в водоносных пластах. М.: Недра, 1973. 207 с.
3. *Михайловский А.А., Белецкая Е.О.* Технология стабилизации циклической эксплуатации ПХГ в малоамплитудных ловушках водоносных пластов // Вести газовой науки. 2023. № 4(56). С. 54–61. EDN: QERJYD
4. *Михайловский А.А., Григорьев А.В., Таран А.А.* Изучение возможности гидродинамической стабилизации циклической эксплуатации газовой залежи подземного хранилища газа в сложно построенной малоамплитудной водоносной структуре // Вести газовой науки. 2024. № 4(60). С. 169–178. EDN: RNYQTM
5. *Фейзуллаев А.А., Годжаев А.Г.* Влияние неоднородности геологического строения резервуара на режим эксплуатации месторождения / подземного хранилища газа Гарадаг (Азербайджан) // Горные науки и технологии. 2021. Т. 6, № 2. С. 105–113. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-105-113>
6. *Фейзуллаев А.А., Годжаев А.Г., Мамедова И.М.* Особенности флюидодинамики в длительно эксплуатирующихся неоднородных газовых резервуарах // Горные науки и технологии. 2022. Т. 7, № 1. С. 18–29. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-18-29>
7. *Хайдина М.П., Некрасов А.А., Колесниченко А.В.* Численные эксперименты по оценке влияния микрон неоднородности пласта водоносного коллектора при создании ПХГ // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2018. № 4(293). С. 65–72. EDN: YRRYBN
8. *Хайдина М.П., Некрасов А.А., Татлок Т.С.* Снижение водного фактора при эксплуатации подземного хранилища газа в водоносных пластах // Нефтепромысловое дело. 2020. № 6(618). С. 53–61. [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2020-6\(618\)-53-61](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2020-6(618)-53-61)

9. Михайловский А.А. Пластовые потери газа на ПХГ в водоносных горизонтах // Георесурсы. 2022. Т. 24, № 3. С. 182–186. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.15>
10. Троицкий В.М., Григорьев Б.А., Рассохин С.Г. и др. Физическое моделирование циклов закачки и отбора газа при разработке и эксплуатации ПХГ. Гистерезис фазовых проницаемостей // Вести газовой науки. 2019. № 1(38). С. 18–28. EDN: DNDYWX
11. Попович А.П., Фархутдинов В.М. Влияния гистерезиса относительной фазовой проницаемости на распределение газонасыщенности в пласте при гидродинамическом моделировании эксплуатации подземных хранилищ газа // Вести газовой науки. 2026. № 1(65). С. 15–24. EDN: RACFNS
12. Gao Y., Chu H., Ren Z., et al. Impact of relative permeability hysteresis on pressure transient behavior and storage capacity in underground gas storage with well interference // Energy. 2025. Vol. 333. P. 137402. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137402>
13. Гайсин А.Р., Шаяхметов А.И., Пономарёв А.И. и др. Особенности формирования области газонасыщенности при создании ПХГ в истощенной газовой залежи в коллекторе трещиновато-порового типа с активным аквифером // Георесурсы. 2024. Т. 26, № 1. С. 136–144. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.1.12>
14. Гайсин А.Р., Шаяхметов А.И., Пономарев А.И. Физическое моделирование формирования насыщенности в переходной зоне газоводяного контакта при упруговодонапорном режиме эксплуатации подземных хранилищ газа в низкопроницаемых коллекторах // Записки Горного института. 2026. Т. 279. С. 152–159. EDN: HPYFIM
15. Амшинов Л.М., Ахметов Т.А., Ермолаев А.И. Исследование влияния природных и технологических параметров на эффективность процессов создания и эксплуатации подземных хранилищ газа в низкопроницаемых пластах-коллекторах // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2024. № 3(316). С. 87–97. EDN: ANXLKK
16. Мулявин С.Ф., Колев Ж.М., Мамчистова Е.И., Насырова А.И. Численное моделирование подземного хранения газа в водоносном наклонном пласте // Наука. Инновации. Технологии. 2020. № 4. С. 41–52. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2020.4.4>
17. Мельников Е.А., Бондарев В.Л., Костиков С.Л., Кошелев Д.А. Моделирование сценариев возможных вариантов компенсации отклонений от циклической эксплуатации для подземных хранилищ газа, созданных в водоносных пластах, при возникновении форс-мажорных ситуаций // Территория Нефтегаз. 2020. № 3–4. С. 124–127. EDN: CPBGZP
18. Колодяжный И.А., Сергеев А.С., Поваров Д.А., Формин А.В. Технологические решения для повышения надежности эксплуатации подземных хранилищ газа в современных условиях развития единой системы газоснабжения Российской Федерации // Газовая промышленность. 2021. № 1(811). С. 78–89. EDN: ELUUEO
19. Затолокина И.Г., Костиков С.Л., Королева В.П. Опыт ликвидации осложнений, возникающих при эксплуатации ПХГ в водоносном пласте // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 7. С. 48–53. <https://doi.org/10.30713/0130-3872-2019-7-48-53>
20. Воронов С.А., Бузинов С.Н. Управление работой пласта при создании и эксплуатации ПХГ // Газовая промышленность, 2012. № S(684) С.76–79. EDN: PYAVDB
21. Shulkova L.A., Skosyrev A.V., Novoselova R.V. The improvement of quality of underground gas storage designing (UGS) in water-bearing structure by using 3-D geological and hydrodynamic

computer modeling // International Gas Union World Gas Conference Papers: 24th World Gas Conference 2009, Buenos Aires, Argentina, 5–9 October 2009. Red Hook, NY: Curran, 2009. Vol. 4. P. 2619–2622.

Информация об авторах

Максим Леонидович Непомнящий – аспирант, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия; SPIN-код: 9768-8617, <https://orcid.org/0009-0004-1401-3002>; e-mail: peromtaх@yandex.ru

Мария Павловна Хайдина – канд. техн. наук, доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия; SPIN-код: 3351-9497, <https://orcid.org/0000-0002-8823-0921>; e-mail: khaydina.m@gubkin.ru

Поступила в редакцию 17.07.2026

Принята к публикации 26.09.2026

RESEARCH ISSUES OF PROJECTING, EXPLOITATION, AND MONITORING OF UNDERGROUND HYDROCARBON STORAGE FACILITIES

Original article

Effect of parameters over the compactness of gas-saturated area of a multidome underground gas storage facility in water-saturated layer

Maxim L. Nepomnyashchy, Maria P. Khaidina ✉

National University of Oil and Gas "Gubkin University", 65 Leninsky Ave., Bldg. 1, Moscow, 119991, Russia

Abstract. *Introduction.* Currently, in research on the influence of geometric and filtration parameters on the formation of a gas-saturated area during the creation and operation of underground gas storage facilities, there is no comprehensive quantitative criterion that would allow for comparing the compactness of the gas-saturated area under different injection scenarios and various geometric parameters of traps. *Objective.* To study the influence of the filtration-capacity and geometric parameters of traps with a dome structure on the compactness of the gas-saturated area when creating a two-dome underground gas storage facility in a water-bearing formation. *Materials and methods.* All figures and numerical values presented in the paper were obtained as a result of three-dimensional hydrodynamic modeling using the tNavigator software package. To quantitatively assess reservoir compactness, the authors introduced a geometric efficiency coefficient. *Results.* Based on three-dimensional hydrodynamic modeling, it was established that the presence of a second dome leads to asymmetry of the gas-saturated area relative to the center of the dome-shaped trap. It was shown that, with simultaneous operation of the domes in a two-dome system, an increase in the amplitude of the domes and the permeability of the reservoir contributes to an increase in compactness, while a decrease in the permeability anisotropy coefficient leads to an increase in the gas-spreading area and a decrease in the geometric efficiency coefficient. It was found that when the same amount of gas is injected into traps of equal volume but different amplitudes, the compactness of the gas-saturated area in a high-amplitude dome is significantly higher than in a low-amplitude one. It was established that the influence of the distance between the domes on the simultaneous injection of gas into a two-dome system within the considered range of 500–1500 m is insignificant. *Conclusion.* The results obtained made it possible to identify the factors influencing the compactness of the gas-saturated area of a two-dome underground gas storage facility, which creates the prerequisites for developing optimization criteria aimed at forming a compact artificial gas deposit.

Keywords: effect of trap parameters; gas saturation; compactness of a gas-saturated area; underground gas storage; multidome system; aquifer; hydrodynamic modeling; asymmetry

Funding: the work received no funding.

✉ Maria P. Khaidina, khaidina.m@gubkin.ru

© Nepomnyashchy M.L., Khaidina M.P., 2026



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

For citation: Nepomnyashchy M.L., Khaidina M.P. Effect of parameters over the compactness of gas-saturated area of a multidome underground gas storage facility in water-saturated layer. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2026. Vol. 17, No. 3. P. 440–460. (In Russ.).

Author contributions

Maxim L. Nepomnyashchy – methodology, formal analysis, investigation, writing – original draft, writing – review & editing.

Maria P. Khaidina – project administration, conceptualization.

All the authors approved the final version of the publication.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Use of artificial intelligence

Generative artificial intelligence tools were not used in writing the text of the article.

References

1. Nepomnyashchy M.L., Khaydina M.P. Formation of a gas-saturated area when creating a two-dome UGS in aquifer reservoirs: comparative analysis and efficiency criterion. *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. 2026, No. 4(154). P. 30–36. (In Russ.).
2. Levykin E.V. *Technological Design of Gas Storage in Aquifers*. Moscow: Nedra, 1973. 207 p. (In Russ.).
3. Mikhaylovsky A.A., Beletskaya Ye.O. UGS cyclic operation stabilization technology in low-amplitude aquifer traps. *Vesti gazovoy nauki*. 2023. No. 4(56). P. 54–61. (In Russ.).
4. Mikhailovskiy A. A., Grigoryev A.V., Taran A.A. Studying the possibility of hydrodynamic stabilization of the cyclic operation of the artificial gas deposit of the UGS in a difficultly built low-amplitude water-bearing structure. *Vesti gazovoy nauki*. 2024. No. 4(60). P. 169–178. (In Russ.).
5. Feyzullayev A.A., Gojayev A.G. Influence of geological reservoir heterogeneity on exploitation conditions of Garadagh field / underground gas storage (Azerbaijan). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021. Vol. 6, No. 2. P. 105–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-105-113>
6. Feyzullayev A.A., Gojayev A.G., Mamedova I.M. Features of fluid dynamics in long-term heterogeneous gas reservoirs. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022. Vol. 7, No. 1. P. 18–29. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-18-29>
7. Khaydina M.P., Nekrasov A.A., Kolesnichenko A.V. Numerical experiment to evaluate microheterogeneity of aquifer reservoir affect while creating UGS. *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. 2018. No. 4(293). P. 65–72. (In Russ.).
8. Khaydina M.P., Nekrasov A.A., Tatlok T.S. Decreasing of water breakthrough during underground gas storage operation in aquifers. *Oilfield Engineering*. 2020. No. 6(618). P. 53–61. (In Russ.). [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2020-6\(618\)-53-61](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2020-6(618)-53-61)

9. Mikhailovsky A.A. Reservoir gas losses at UGS facilities in aquifers. *Georesursy*. 2022. Vol. 24, No. 3. P. 182–186. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.15>
10. Troitskiy V.M., Grigoryev B.A., Rassokhin S.G., et al. Physical modelling of gas cycling during development and operation of an underground gas storage. Hysteresis of phase permeability. *Vesti gazovoy nauki*. 2019. No. 1(38). P. 18–28. (In Russ.).
11. Popovich A.P., Farkhutdinov V.M. Effect of relative phase permeability hysteresis on bed distribution of gas saturation at hydridynamic simulation of UGSS operation. *Vesti gazovoy nauki*. 2026. No. 1(65). P. 15–24. (In Russ.).
12. Gao Y., Chu H., Ren Z., et al. Impact of relative permeability hysteresis on pressure transient behavior and storage capacity in underground gas storage with well interference. *Energy*. 2025. Vol. 333. P. 137402. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137402>
13. Gaysin A.R., Shayakhmetov A.I., Ponomarev A.I., et al. Features of the formation of a gas-saturated area during the creation of an underground gas storage in a depleted gas reservoir in a fractured-pore type reservoir with an active aquifer. *Georesursy*. 2024. Vol. 26, No. 1. P. 136–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2024.1.12>
14. Gaysin A.R., Shayakhmetov A.I., Ponomarev A.I. Physical modeling of saturation formation in the transition zone of a gas-water contact under the elastic-water drive during underground gas storage in low-permeability reservoirs operation. *Journal of Mining Institute*. 2026. Vol. 279. P. 152–159.
15. Amshinov L.M., Akhmetov T.A., Ermolaev A.I. Study of the influence of natural and technological parameters on the efficiency of the processes of creation and operation of underground gas storage in low-permeable reservoirs. *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. 2024. No. 3(316). P. 87–97. (In Russ.).
16. Mulyavin S.F., Kolev Zh.M., Mamchistova E.I., Nasyrova A.I. Numerical simulation of underground gas storage in an inclined aquifer. *Science. Innovations. Technologies*. 2020. No. 4. P. 41–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2020.4.4>
17. Melnikov E.A., Bondarev V.L., Kostikov S.L., Koshelev D.A. Simulation of scenarios of optional versions for deviation offset of the cyclic operation in force majeure circumstances for underground gas storage facilities created in water-bearing formations. *Territoriya Neftegaz*. 2020. Nos. 3–4. P. 124–127. (In Russ.).
18. Kolodjzhny I.A., Sergeev A.S., Povarov D.A., Formin A.V. Process solutions for improving the operation reliability of underground gas storage facilities in current development conditions of the unified gas supply system of Russia. *Gazovaya promyshlennost*. 2021. No. 1(811). P. 78–89. (In Russ.).
19. Zatolokina I.G., Kostikov S.L., Koroleva V.P. The experience of difficulties elimination that occur during operation of underground gas storage (UGS) in an aquifer. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*. 2019. No. 7. P. 48–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.30713/0130-3872-2019-7-48-53>
20. Voronov S.A., Buzinov S.N. Management of reservoir performance during the creation and operation of underground gas storage facilities. *Gazovaya promyshlennost*. 2012. No. (S)684. P. 76–79. (In Russ.).
21. Shulkova L.A., Skosyrev A.V., Novoselova R.V. The improvement of quality of underground gas storage designing (UGS) in water-bearing structure by using 3-D geological and hydrodynamic computer modeling. In: *International Gas Union World Gas Conference Papers: 24th World Gas*

Conference 2009, Buenos Aires, Argentina, 5–9 October 2009. Red Hook, NY: Curran, 2009. Vol. 4. P. 2619–2622.

Information about the authors

Maxim L. Nepomnyashchy – Postgraduate, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0009-0004-1401-3002>; e-mail: nepommax@yandex.ru

Maria P. Khaidina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8823-0921>; e-mail: khaydina.m@gubkin.ru

Received 17 July 2026

Accepted 26 September 2026