

УДК 553.98.048-047.58

СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНТРОЛЬНЫХ ГОРИЗОНТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПОДЗЕМНОГО ГАЗОХРАНИЛИЩА

Гасумов Рамиз Алиджавад оглы^{1,2},
R.Gasumov@yandex.ru

Гасумов Эльдар Рамизович^{3,4},
gasumov@me.com

Велиев Вилаят Мамед оглы⁴,
R.Gasumov@yandex.ru

Гасумов Вагиф Алиджавад оглы⁴,
gasumov@yahoo.com

Сулейманов Газанфар Салман оглы³,
gasumov@me.com

Ибрагимова Садагат Вели гызы³,
gasumov@me.com

¹ Северо-Кавказский федеральный университет,
Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.

² АО «СевКавНИПИгаз»,
Россия, 355000, г. Ставрополь, ул. Ленина, 419.

³ Азербайджанский университет нефти и промышленности,
Азербайджан, AZ1010, г. Баку, пр. Свободы, 20.

⁴ Азербайджанский технический университет,
Азербайджан, 370073, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25.

Актуальность. Подземные хранилища газа относятся к типу геогидродинамических систем, требующих постоянного контроля и мониторинга за происходящими процессами в подземном резервуаре и скважине, так как образования в истощённых месторождениях углеводородов искусственной газовой залежи являются основным и наиболее сложным технологическим объектом в газовой инфраструктуре. Мониторинг технологических процессов в объектах хранения газа проводится с помощью геофизических исследований эксплуатационных и наблюдательных скважин. Для обеспечения герметичности и безопасности эксплуатации объекта хранения газа необходимо разработать трёхмерную геологическую модель, позволяющую осуществить систему мониторинга происходящих процессов в верхних контрольных горизонтах и приповерхностных отложениях в пределах горного отвода, оценить текущие техногенные запасы газа и их распределение по разрезу.

Цель: создание трехмерной геологической модели верхних контрольных горизонтов и приповерхностных отложений для мониторинга герметичности и безопасности эксплуатации подземного хранилища природного газа.

Объекты: система мониторинга герметичности подземного хранилища газа: верхние контрольные горизонты и приповерхностные отложения подземного хранилища газа в границах горного отвода.

Методы. Для построения трехмерной геологической модели верхних контрольных горизонтов и приповерхностных отложений были использованы: данные геологического изучения района и стратиграфии отложений; контур стратиграфической поверхности кровли толщи отложений; оцифрованная информация с карт подсчета запасов; координаты скважин и пласто-пересечений. Для создания цифровой фильтрационной модели использованы геолого-физические, промысловые и аналитические данные. Стратиграфическая привязка целевых отражающих горизонтов производилась на основании данных по скважинам. Использованы модели программного обеспечения «iNavigator», для геологического моделирования – «Дизайнер геологии» и для газодинамического моделирования – «Дизайнер моделей». На этом основании в структуре базы данных для моделирования выделены объекты (точки) по результатам промысловой, геологической, геофизической информации. Данные по расположению скважин загружались в формате «Welltracks». Для построения структурных поверхностей горизонтов в программу загружены файлы в формате txt, в пределах программного продукта, именованные «Маркеры».

Результаты. Разработана структура, и создана информационная промыслово-геологическая база данных верхней части разреза подземного хранилища, учитывающая имеющуюся геолого-промысловую и исследовательскую информацию и данные, полученные при бурении эксплуатационных скважин на хадумские отложения и наблюдательных скважин на хадумский горизонт и зеленую свиту; разработана постоянно действующая геолого-технологическая модель верхних контрольных горизонтов и приповерхностных отложений подземного хранилища (геологическая и гидродинамическая модели); на основании проведенных геологических построений проведена оценка техногенного объема газа в верхних контрольных горизонтах; разработана система мониторинга герметичности подземного хранилища имеющимися и проектными скважинами на верхние контрольные горизонты и приповерхностные отложения.

Ключевые слова:

Горный отвод, газ, скважина, подземное хранилище газа, бурение, контрольные горизонты, отложения, мониторинг, герметичность, трехмерная геологическая модель.

Введение

Северо-Ставропольское подземное хранилище газа (ССПХГ) является самым крупным в Европе, с актив-

ными объёмами около 90 млрд куб. м природного газа, созданное в истощенных газовых залежах, приуроченных к хадумскому горизонту и зеленой свите Северо-Ставропольско-Пелагиадинского месторождения, вклю-

чае два самостоятельных эксплуатационных объекта хранения с площадью горного отвода в хадумском горизонте и зеленой свите 689,32 км². Подземное хранилище в хадумском горизонте занимает большую площадь, расположено гипсометрически выше и в плане перекрывает хранилище в зеленой свите [1–3]. Территория горного отвода ограничена многоугольником, вмещающим структуру двух хранилищ с учетом их пространственных контуров.

Несмотря на то, что в пределах значительного по площади горного отвода ПХГ в наблюдательном фонде находится большое количество скважин, контролирующих герметичность объекта хранения, возникает необходимость бурения новых скважин. Это связано тем, что имеются отдельные неконтролируемые зоны, неохваченные наблюдательными скважинами на верхние контрольные горизонты и приповерхностные отложения. Контроль и мониторинг за возможным газопроявлением в вышележащих контрольных горизонтах осуществляют комплексом наземных методов и измерениями по контрольным скважинам насыщенности пласта коллектора на основе постоянно действующей геолого-технологической модели подземной хранилища. В связи с чем создание трехмерной геологической модели верхних контрольных горизонтов и приповерхностных отложений позволит более качественно проводить мониторинг герметичности и безопасности эксплуатации ПХГ [4–6].

Изучение литолого-стратиграфического разреза производилось по данным бурения структурно-картировочных и глубоких разведочных скважин. Корреляция разрезов по Северо-Ставропольско-Пелагиадинской площади строилась по данным кернового материала, каротажных диаграмм и микропалеолитологических исследований [7].

Хадумский горизонт в нижней части представлен глинами темно-серыми плотными слоистыми, в верхней, где глинистость уменьшается, а песчанность увеличивается, – песками, алевролитами, алевролитами. В кровле горизонта залегают глины плотные, слабоизвестковые, общей толщиной 107–119 м.

Основным контрольным горизонтом на подземном хранилище является выдержанный по площади чокракский горизонт, где пробурено 19 контрольных скважин, которые размещены на вышележащие над чокракскими отложениями горизонты. Для подземного хранилища в отложениях зеленой свиты первым контрольным горизонтом является бурая свита.

Контроль за составом пластовых вод, их газонасыщенностью и составом растворенных газов в пластовых водах осуществляется наблюдательными скважинами, контролирующими герметичность объекта, где выделяются слабогазонасыщенные, газонасыщенные и водонасыщенные пласты. Дистанционные геофизические исследования на северном, северо-восточном и южных участках подземного хранилища проводились методами: зондирование становлением поля в ближайшей зоне (ЗСБ) – разрез до глубины 700 м (хадумские и верхние горизонты); вертикальное электрическое зондирование методом вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП) – верхние горизонты.

Результаты лабораторных исследований керна продуктивных пластов позволили установить, что эффективная пористость коллектора чокракских отложений (толщина горизонта с максимальной газонасыщенностью составляет 3,2 м) в среднем составляет 17,4 %. Результаты исследований керна продуктивных пластов чокракских отложений площади представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, эффективная пористость коллектора чокракских отложений в среднем составляет 17,4 %, а проницаемость коллектора по напластованию изменяется в пределах $170\text{--}2950 \times 10^{-15} \text{ м}^2$.

Таблица 1. Параметры продуктивных пластов чокракских отложений

Table 1. Parameters of the productive formations of the Chokrak deposits

№ скважин Well no.	Глубина кровли пласта (абсол. отг.), м Seam top depth (absolute level), m	Флюидо насыщенность Fluid saturation	Результаты исследований Research results		
			Пористость Porosity, %		Проницаемость, $\times 10^{-15} \text{ м}^2$ Permeability, $\times 10^{-15} \text{ м}^2$
			Эффективная Effective	Открытая Open	
16	96	газ (gas)	17,4	24,5...34,9	2950
21	107	газ (gas)			170
2	99	вода (water)			–
3	98	вода (water)			–
13	92	вода (water)			–
14	85	вода (water)			–

Структура базы данных для трехмерного моделирования верхних контрольных горизонтов и приповерхностных отложений

Для создания геологической и газодинамической модели верхних контрольных горизонтов и приповерхностных отложений были выделены объекты (точки) с использованием промысловой, геологической, геофизической информации [8, 9]:

- Объекты: контрольные горизонты (геологические построения): бурая свита, чокракские отложения, конк-караганские отложения, сарматские отложения, при этом майкопские отложения рассматриваются как граница модели верхних контрольных горизонтов над хадумским горизонтом, отложения бурой свиты – как промежуточный контрольный горизонт над зеленой свитой; объекты хранения в хадумском горизонте и зеленой свите (технологическая информация по эксплуатационным скважинам, информация о техническом состоянии скважин различной категории, вскрывающих пласт-коллектор подземных хранилищ и расположенных в пределах горного отвода).
- Скважины: контрольные скважины на верхние горизонты и приповерхностные отложения (имеющиеся и проектные); эксплуатационные действующие скважины хадумского горизонта и зеленой свиты; скважины разного назначения, имеющиеся и проектные, расположенные в пределах горного

отвода подземного хранилища, по которым проводятся или будут проводиться работы, пополняющие промыслово-геологическую информацию по верхним горизонтам.

- в) Исходные данные: конструкция скважин разных категорий; результаты площадных исследований; результаты исследований скважин; результаты исследований керна; геолого-промысловые данные.

Для программного обеспечения «Navigator» с общей внутренней системой хранения данных блоков – геологическое и газодинамическое моделирование – была разработана структура информационной промыслово-геологической базы данных (БД) верхней части разреза подземного хранилища (рис. 1).

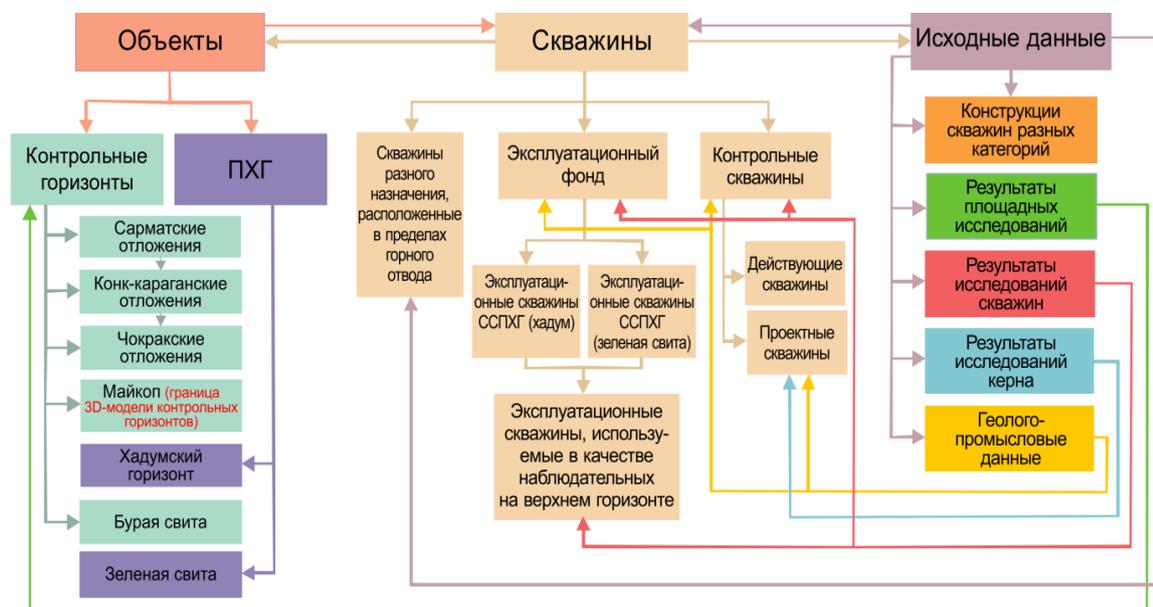


Рис. 1. Структура базы данных для моделирования верхних контрольных горизонтов и приповерхностных отложений
 Fig. 1. Database structure for modeling upper control horizons and near-surface deposits

Определение значений относительной газонасыщенности и газонасыщенности верхних горизонтов (K_g) в зависимости от глубины залегания позволило построить зависимости между ними с привязкой к глубине залегания подошвы чокракского горизонта (выделением скважин с водонасыщенным интервалом), установить граничные значения «коллектор-неколлектор» и построить по характеру насыщения палетку для разделения коллекторов горизонта [10, 11].

По результатам обработки результатов гидродинамических исследований восьми скважин чокракского горизонта на стационарных режимах фильтрации и по значению коэффициента фильтрационного сопротивления были рассчитаны значения фазовой проницаемости по газу, установлено изменение газонасыщенности пластовых вод по разрезу верхних контрольных горизонтов, содержание углеводородного газа, азота, углекислого газа, ионов хлора в воде, отобранной из скважин на верхних горизонтах.

Трехмерная геологическая модель верхних контрольных горизонтов и приповерхностных отложений подземного хранилища

Трехмерная геологическая модель верхних горизонтов в пределах горного отвода подземного хранилища разрабатывалась с применением программного комплекса «Navigator», являющегося единым программным комплексом, содержащим модули для построения геологических моделей, расчета гидродина-

мики и геомеханики, моделирование PVT (свойств флюида), построение моделей скважины и сети сбора. Данный программный комплекс позволяет выполнить все этапы построения модели, в том числе: структурное, фациальное и петрофизическое моделирование, создание трехмерной сетки, подсчет объемов и запасов [3, 12]. Для построения геологической модели верхних горизонтов была создана информационная БД, представленная в виде электронных таблиц, куда вносились результаты геофизических исследований, результаты ГИС-бурения и определения относительной газонасыщенности по методам нейтронного гамма-каротажа (НГК). Полученные данные ГИС-бурения позволили уточнить стратиграфические привязки в зоне расположения вновь пробуренных наблюдательных скважин на хадумский горизонт и зеленую свиту.

В модель внесены файлы нескольких форматов, содержащие: геофизические кривые, альтитуды, координаты устьев и забоев скважин. При построении в модель загружены файлы, которые содержат информацию о формате, разделителях, номер и альтитуду скважины, шаг кривой, условный ноль, под меткой «CURVE» указаны обозначения параметров, а далее расположены геофизические кривые с шагом 0,1 м в виде численных значений параметров на соответствующей глубине. В модель загружены 309 скважин с вертикальной конструкцией, в связи с чем координаты устья совпадают с координатами забоя скважин

и не меняются на протяжении всей глубины моделируемого интервала. Содержание файла представляет собой набор данных, упорядоченных в столбцы, включающих название скважины, наименование маркера и глубину его расположения на стволе скважины.

Объектами моделирования являются отложения верхних горизонтов и приповерхностные отложения в пределах горного отвода: холоднородниковский горизонт, форштадский горизонт, ясеновская свита, криптомактровый горизонт (флюидоупор), мамайский горизонт, нижний сармат, конкский, караганский и чокракский горизонты.

В структурном плане (терригенные коллекторы) горизонты залегают согласованно, имеют небольшую мощность. В пределах моделируемой зоны присутствуют обширные зоны обнажения размытых вышележащих пластов, от холоднородниковского до криптомактрового горизонта. Поверхность горизонтов построена интерполяцией точек маркеров методом наименьших квадратов. Из-за неравномерной (различной) плотности расположения скважин на территории горного отвода при построении использованы разные величины коэффициентов при корреляции межскважинного пространства [5, 13].

Основой трехмерного моделирования является 3D сетка и структурные поверхности моделируемых горизонтов, позволяющие объединить значения параметров в геометрический ограниченный объем, в пределах которого в дальнейшем будут происходить расчеты искомых параметров [14]. Созданная сетка разделена на восемь зон, соответствующих указанным горизонтам, где оптимальный размер ячеек, используемый при построении, по горизонтали 100×100 м, а связи с высокой плотностью расположения скважин –

в сводовой части пластов. Учитывая, что в геологической среде анизотропия по вертикали значительно выше и пласты моделируемого объекта маломощные, высота ячейки значительно меньше, чем длина и ширина, и в среднем составляет 2,3 м. Параметры 3D сетки представлены в табл. 2.

Определение геологических параметров моделируемого объекта проводилось на основе присвоенных свойств 3D сетке. Свойства сетки заданы интерполяцией результатов интерпретации данных геофизических исследований [15–17]. Высокие ранги интерполяции свойств 3D сеток связаны с недостаточным количеством данных и большим расстоянием между скважинами (точками интерполяции). Литология сетки построена на основании данных результатов интерпретации геофизических исследований по определению коллекторских свойств пропластков по данным ГИС-бурения с учетом корректировки диапазона параметра газонасыщенности. Осредненные скважины, привязанные к сетке, приняты за основу при моделировании пористости отложений верхних горизонтов, которые содержат осредненные данные геофизических кривых пористости, загруженных в модель [4, 18, 19].

Для определения количественных параметров корреляции межскважинного пространства был произведен вариограммный анализ для открытой пористости чокракского горизонта.

Для построения куба флюидонасыщения был произведен вариограммный анализ газонасыщенности пласта чокракского горизонта. Полученное распределение газонасыщенности и открытой пористости чокракского горизонта представлено в виде профильных разрезов (рис. 2, 3).

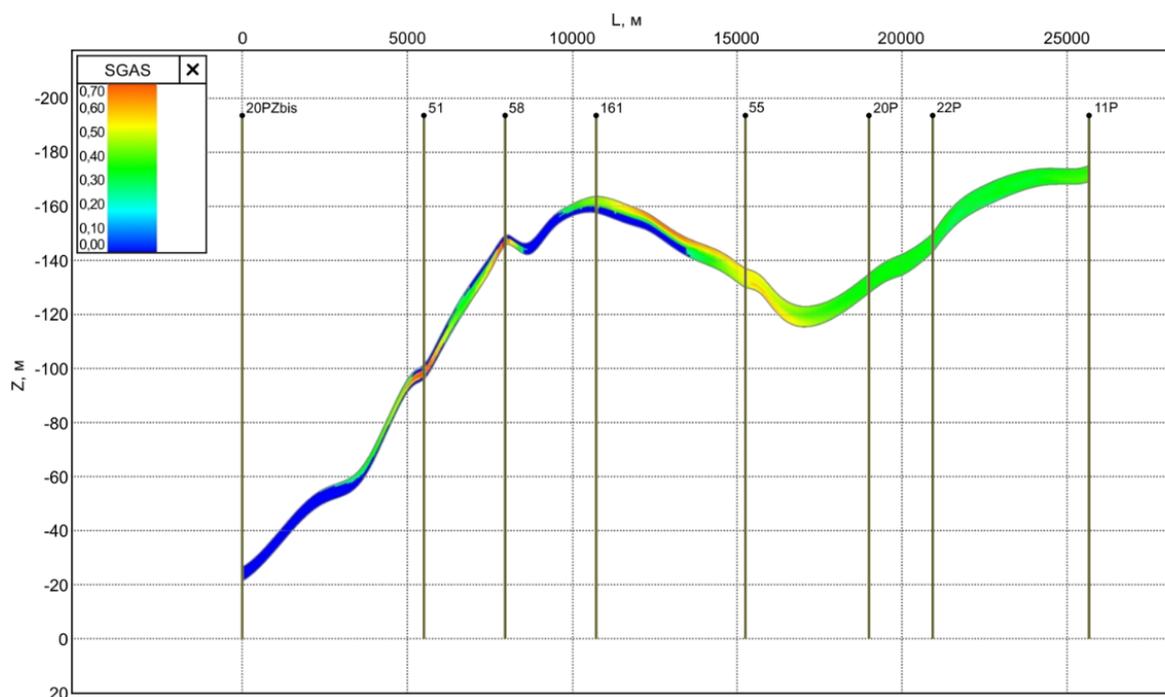


Рис. 2. Распределение газонасыщенности в чокракском горизонте по профильному разрезу I-I

Fig. 2. Distribution of gas saturation in the Chokrak horizon along the profile section I-I

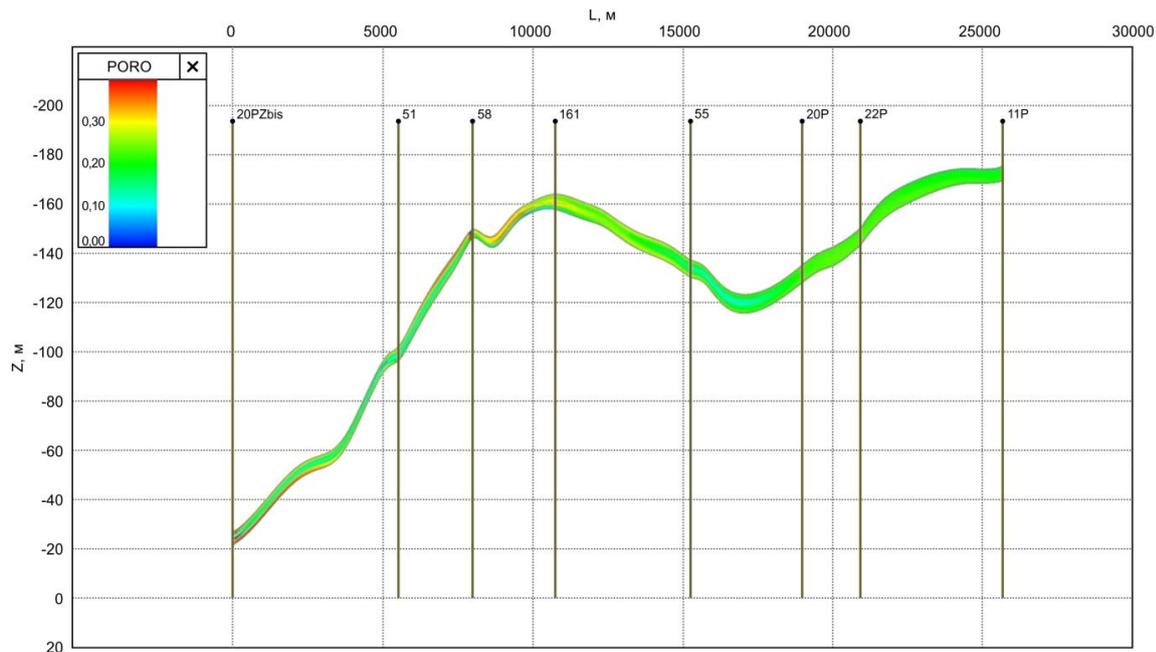


Рис. 3. Распределение открытой пористости в чокракском горизонте по профильному разрезу I-I

Fig. 3. Distribution of open porosity in the Chokrak horizon along the profile section I-I

С целью определения зоны газонасыщенности чокракского горизонта проведено сопоставление результатов ГИС-бурения в скважинах, расположенных в пределах границ горного отвода, с результатами исследований скважин, пробуренных в своде подземного хранилища. Это позволило провести переинтерпретацию геофизических данных и охарактеризовать вскрытые интервалы верхних горизонтов как водонасыщенные [1, 20].

Таблица 2. Основные параметры используемой трехмерной сетки

Table 2. Main parameters of the used 3D mesh

Общее количество активных ячеек Total number of active cells	8789425
Количество столбцов по оси X Number of columns along the x-axis	410
Количество столбцов по оси Y Number of columns along the y-axis	280
Количество слоев/Number of layers	90
Зоны/Zones	Блоки/Blocks
Холоднородниковский горизонт Kholodnorodnikovsky Horizon	685950
Форштадская свита/Forstad Formation	786393
Ясеновская свита/Yasenovskaya suite	793790
Криптомактровый горизонт/Cryptomacro horizon	942488
Мамайский горизонт/Mamai skyline	988804
Нижний сармат /Lower Sarmatian	1148000
Конкский горизонт/Konk skyline	
Караганский горизонт/Karagan horizon	
Чокракский горизонт/Chokrak horizon	

Контур газовой водяного контакта (ГВК) по чокракскому горизонту был определен по результатам интерпретации материалов по ГИС-бурению, также принималась во внимание структура горизонтов. Анализ гидрохимического контроля имеющихся скважин позволил уточнить их приближенность к контуру ГВК.

Оценка текущего объема техногенного газа проводилась по чокракскому горизонту, газонасыщенный поровый объем определялся по каждому горизонту отдельно – чокракскому, караганскому и конскому. Карты газонасыщенности, эффективных газонасыщенных толщин, структурные карты и карты распределения пластового давления строились по результатам замеров [21–23].

Средневзвешенное пластовое давление чокракской техногенной залежи составило 0,4 МПа, в конк-караганском горизонте – 0,2 МПа. По результатам трехмерной геологической модели выделяются отдельные газонасыщенные участки. Построен контур, охватывающий зоны газонасыщенности данных горизонтов в диапазоне 27–65 % и для конского горизонта в диапазоне 29–70 % от площади геологической модели, горного отвода.

В пределах горного отвода подземного хранилища расположена природная газовая залежь в чокракских отложениях – Северо-Ставропольское газовое месторождение. Начальные запасы газовой залежи чокракских отложений составляли 116 млн м³. На собственные нужды из месторождения было отобрано 4 млн м³ газа, остаточные запасы составили 112 млн м³ и переведены в категорию забалансовых. В настоящее время залежь не эксплуатируется [4–6].

Трехмерная газодинамическая модель верхних контрольных горизонтов

В рамках мониторинга технологических процессов в объектах хранения газа проводятся ГИС в эксплуатационных и наблюдательных скважинах. Результаты исследований последних лет показали, что по данным термометрии перетоки газа из подземных хранилищ в вышележащие верхние контрольные горизонты не выявлены, переток газа в чокракский горизонт равен

объему техногенного газа, определенного в трехмерной геологической модели [24, 25].

Предположительно источниками газонасыщенных техногенных участков могли являться отдельные скважины хадумского горизонта и зеленой свиты в период разработки месторождений и создания подземных хранилищ газа. На рис. 4 показано распределение газонасыщенности чокракских отложений в пределах контура техногенной залежи.

По данным изменения динамики пластового давления в чокракском и хадумском горизонтах весь период переточных процессов можно разбить на три этапа:

- 1) разработка месторождения (1957–1984 гг.), на котором наблюдалось снижение пластового давления в хадумском горизонте и рост пластового давления (техногенного газа) в чокракском горизонте;
- 2) формирование объекта хранения в хадумском горизонте (до 1997 г.) с ростом пластового давления в чокракском горизонте от 0,13 до 1,15 МПа;
- 3) распределение техногенного газа в чокракских отложениях (с 1997 г.) после проведения ремонтных работ в скважине с наличием перетока газа и её ликвидация.

Газогидродинамический процесс перетока газа из хадумских отложений в чокракские в целом сопоставим с формированием объекта хранения в водонос-

ном пласте [27, 28]. В рассматриваемом случае параметр «суточный переток газа» соответствует параметру «суточная приемистость скважины».

Максимальный перепад пластового давления между хадумским и чокракским горизонтами отмечен на начало периода разработки Северо-Ставропольско-Пелагиадинского месторождения – 6,24 МПа. Можно предположить, что при незначительной толщине пласта чокракского горизонта на начальном этапе наблюдалась струйная миграция свободного газа от источника по напластованию. В этом случае распределение газа по коллектору чокракского горизонта определялось пористостью и проницаемостью коллектора, а также углом подъема породы [3, 26, 27].

Моделирование по аналогии «закачка газа в пласт» при разных принимаемых параметрах не дала положительных результатов, газ сосредотачивался исключительно в зоне источника перетоков и в незначительном объеме в зоне естественной газовой залежи Северо-Ставропольско-Пелагиадинского месторождения (чокрак), что обусловлено малой мощностью пласта и значительной площадью насыщения техногенным газом, в связи с чем параметры моделирования подбирались под модель «струйная миграция газа». Распределение газонасыщенности чокракских отложений в пределах контура техногенной залежи (режим работы по приемистости) показано на рис. 4.

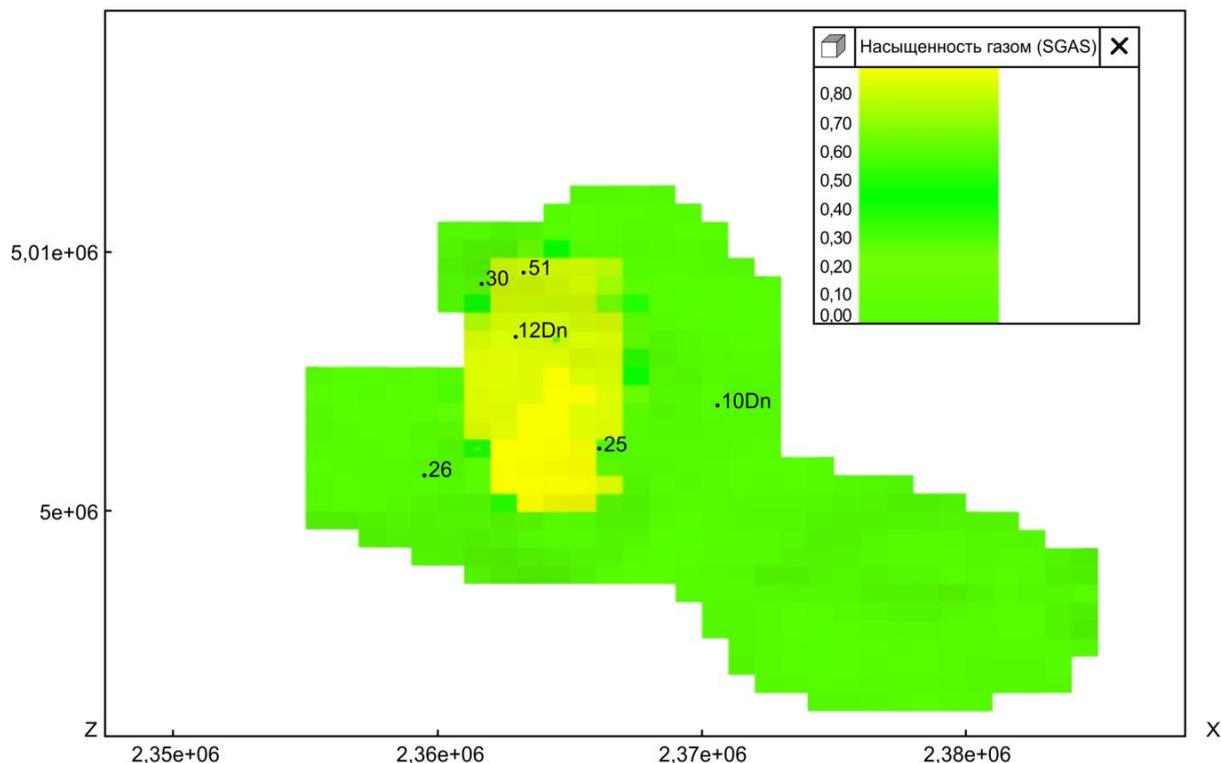


Рис. 4. Распределение газонасыщенности чокракских отложений в пределах контура техногенной залежи (режим работы по приемистости)

Fig. 4. Distribution of gas saturation of Chokrak deposits within the boundaries of the technogenic deposit contour (injectivity mode)

Общим контрольным горизонтом для объектов хранения газа в хадумском горизонте и зеленой свите является чокракский горизонт, распространенный

практически по всей площади горного отвода. По результатам трехмерной геологической модели техногенный газ сосредоточен в основном в пределах

чокракских и конк-караганских отложений, в районе Северо-Ставропольского свода и Пелагиадинского участка [3, 5, 28].

Система мониторинга герметичности на подземном хранилище включает следующие мероприятия по контролю, исследованию и уточнению фильтрационно-емкостных свойств пласта: оценка активности динамических процессов в контрольных горизонтах; проведение ежегодного контроля газонасыщенности верхних горизонтов; исследование кернового материала в проектных контрольных скважинах на чокракский горизонт; гидрохимический и геохимический контроль; ежегодная газовая съемка приповерхностных отложений; газодинамические исследования скважин, расположенных в зоне газонасыщения чокракских отложений [10, 29]. С целью уточнения фильтрационной характеристики чокракских отложений рекомендуется провести единовременные газодинамические исследования скважин на стационарных режимах фильтрации: в контрольных скважинах и вновь пробуренных проектных скважинах, расположенных в зоне газонасыщения чокракских отложений.

С целью получения сравнительной характеристики коллекторских свойств по разрезу интервалы отбора керна в проектных скважинах включают глинистые отложения ниже подошвы чокракских отложений, качественные образцы которых можно получить в зоне устойчивого газонасыщения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипин Я.О., Белкина В.А. Моделирование нефтенасыщенности залежей с учётом переходной водонефтяной зоны на примере месторождения А // Территория нефтегаз. – 2016. – № 5. – С. 22–29.
2. Билибин С.И. Технология создания и сопровождения трехмерных цифровых геологических моделей нефтегазовых месторождений: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2010. – 45 с.
3. Свинцов М.В. Повышение производительности и эксплуатационной надежности скважин подземных хранилищ газа (на примере хадумского горизонта Северо-Ставропольского ПХГ: дис. ... канд. техн. наук. – Ставрополь, 2022. – 127 с.
4. ГОСТ Р 53839-2008. Хранилища природных газов подземные. Правила мониторинга при создании и эксплуатации. – М.: Стандартинформ, 2009. – 18 с.
5. Новые технологии при построении цифровых геологических моделей месторождений углеводородов / А.С. Кашик, С.И. Билибин, Г.Н. Гогоненков, С.А. Кирилов // Технологии ТЭК. – 2003. – № 3. – С. 12–17.
6. Кузнецова Я.В. Моделирование нефтенасыщенности пластов, залегающих под нефтематеринскими породами (на примере верхнеюрских отложений Западной Сибири): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Тюмень, 2016. – 163 с.
7. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Литолого-палеогеографические условия формирования нефтяных месторождений со сложными глинистыми коллекторами (на примере хадум-баталпашинских отложений) // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 5. – С. 25–30.
8. Jennings J.B. Capillary pressure techniques application to exploration and development geology // The American Association of Petroleum Geologist Bulletin. – 1987. – V. 71. – P. 1196–1209.
9. Грищенко М.А. Современные подходы к моделированию нефтенасыщенности сложнопостроенных залежей с целью создания гидродинамических моделей // Геология нефти и газа. – 2008. – № 5. – С. 75–80.
10. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р., Минченко Ю.С. Особенности создания подземных резервуаров в истощенных газоконденсатных месторождениях // Записки горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 418–427.
11. Большакова Е.Ю. Моделирование нефтяных и газовых залежей на основе капиллярно-гравитационной концепции нефтегазонакопления с целью повышения эффективности их разведки и разработки (на примере месторождений Западной Сибири): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Тюмень, 2006. – 200 с.
12. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Математические модели расчета фильтрационных процессов на газоконденсатных месторождениях // О новой парадигме развития нефтегазовой геологии: Материалы Международной научно-практической конференции. – Казань, 2–4 сентября 2020. – Казань: Изд-во «Ихлас», 2020. – С. 174–178.
13. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2009. – 376 с.
14. Забоева А.А. Разработка методик трехмерного геомоделирования в условиях неоднородности и неравномерности геолого-геофизической информации (на примере месторождений Западной Сибири): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Тюмень, 2012. – 167 с.
15. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Особенности цифрового фильтрационного моделирования продуктивных залежей // Наука. Инновации. Технологии. – 2021. – № 2. – С. 7–28.
16. Application of 3D reservoir geological model on Es1 formation, Block Nv32, Shenshi Oilfield, China / A. Rassas, S. Ren, R. Sun, A. Zafar, S. Moharam, Z. Guan, A. Ahmed, M. Alomaisi // Open Journal of Yangtze Oil and Gas. – 2020. – V. 5. – № 2. – P. 54–72.
17. Xiang Li. Three-dimensional geological modeling methods and applications – a Gold Belt Oilfield // 3rd International Conference on Management, Education, Information and Control (MEIC). – Jinan, China, 2015. – P. 3–10.
18. Дойч К.В. Геостатистическое моделирование коллекторов. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2011. – 400 с.

Заключение

Комплексный подход к изучению верхних контрольных горизонтов и приповерхностных отложений в пределах горного отвода (хадумский горизонт и зеленая свита) – анализ литолого-стратиграфического разреза по данным бурения структурно-картировочных и глубоких разведочных скважин, корреляции разрезов по материалам каротажных диаграмм и микропалеолитологических исследований, кернового материала, а также оценка техногенного объема газа в верхних контрольных горизонтах подземного хранилища – позволили разработать структуру и создать информационно-промыслово-геологическую базу данных верхней части разреза подземного хранилища (учитывающую геолого-промысловую и исследовательскую информацию), создать постоянно действующую геолого-технологическую (геологическую и гидродинамическую) модель и разработать систему мониторинга герметичности подземного хранилища имеющихся и проектных скважин.

Изучение геологического строения надпродуктивной части разреза и оценка техногенного объема газа позволили установить, что в пределах горного отвода имеются отдельные неконтролируемые зоны, неохваченные наблюдательными скважинами на верхние контрольные горизонты, определить количество и местоположение дополнительных проектных скважин, позволяющих осуществить систему мониторинга герметичности подземного хранилища.

19. Gao Xingjun. Applied research of NMR movable fluid saturation in development of low permeability oilfield // E3S Web of Conferences Innovative Technologies in Science and Education. – 2020. – V. 210. – P. 1–7.
20. Kuiqian Ma. Techniques for improving the water-flooding of oil fields during the high water-cut stage // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies Nouvelles. – 2019. – V. 74. – P. 1–12.
21. An improved method for quantifying liquid saturation using transparent soil / Juan Wang, Wei Liu, Wenwu Chen, Xuebin Ran, Yanfang Zhang, Gaochao Lin // Advances in civil engineering. – 2019. – V. 1. – P. 1–11.
22. Buckley S.E., Leverett M.C. Mechanism of fluid displacement in sands // Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. – 1942. – V. 146. – P. 107–116.
23. Leverett M.C. Capillary behavior in porous solids // Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. – 1941. – V. 142. – P. 148–152.
24. Li Kewen. Theoretical development of the brooks-corey capillary pressure model from fractal modeling of porous media // Symposium on Improved Oil Recovery. – Tulsa, Oklahoma, 17–21 April, 2004. – P. 3–9.
25. Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V. Application of the Brooks–Corey model in the conditions of lower cretaceous deposits in terrigenous reservoirs of Western Siberia // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 560. – P. 4–12.
26. Elshahawi H., Fathy K., Hiekal S. Capillary pressure and rock wettability effects on wireline formation tester measurements // IEOC 567121999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Houston, Texas, 1999. – P. 1–16.
27. Гасумов Р.А. Обоснование нефтегазонасыщенной толщины и проницаемости нижнемайкопских глинистых коллекторов (на примере месторождений Северного Кавказа) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2018. – № 3. – Т. 13. DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/31_2018.
28. Tikhomirova E.A., Sagirova L.R., Khaibullina K.Sh. A review on methods of oil saturation modelling using IRAP RMS // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 378. – P. 1–6.
29. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р., Минченко Ю.С. Использование геологических особенностей оксфордских отложений при построении цифровой модели продуктивных залежей // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2021. – Т. 16. – № 4. URL: http://www.ngtp.ru/rub/2021/41_2021.html (дата обращения 15.03.2022).

Поступила 26.05.2022 г.

Информация об авторах

Гасумов Р.А., доктор технических наук, профессор кафедры гидрогеомеханического моделирования института «Наука о Земле» Северо-Кавказского федерального университета; генеральный директор АО «СевКавНИПИгаз».

Гасумов Э.Р., кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента Азербайджанского университета нефти и промышленности; докторант Азербайджанского технического университета.

Велиев В., доктор экономических наук, профессор кафедры информационных технологий и программирования Азербайджанского технического университета.

Гасумов В.А., доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем и сети Азербайджанского технического университета.

Сулейманов Г.С., доктор экономических наук, профессор кафедры менеджмента Азербайджанского университета нефти и промышленности.

Ибрагимова С.В., кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента Азербайджанского университета нефти и промышленности.

UDC 553.98.048-047.58

CREATION OF A THREE-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC MODEL OF CONTROL HORIZONS TO STUDY THE SYSTEM FOR MONITORING THE TIGHTNESS OF AN UNDERGROUND GAS STORAGE FACILITY

Ramiz A. Gasumov^{1,2},
R.Gasumov@yandex.ru

Eldar R. Gasumov^{3,4},
gasumov@me.com

Vilayat M. Veliev⁴,
R.Gasumov@yandex.ru

Vagif A. Gasumov⁴,
gasumov@yahoo.com

Gazanfar S. Suleimanov³,
gasumov@me.com

Sadagat V. Ibrahimova³,
gasumov@me.com

¹ North Caucasian Federal University,
1, Pushkin avenue, Stavropol, 355017, Russia.

² JSC «SevKavNIPGaz»,
419, Lenin avenue, Stavropol, 355000, Russia.

³ Azerbaijan University of Oil and Industry,
20, Azadlig avenue, Baku, AZ1010, Azerbaijan.

⁴ Azerbaijan Technical University,
25, G. Javid avenue, Baku Azerbaijan, 370073, Azerbaijan.

Relevance. *Underground gas storage is a type of geohydrodynamic systems that require constant control and monitoring of ongoing processes in an underground reservoir and well, since the formation of an artificial gas deposit in depleted hydrocarbon fields is the main and most complex technological object in the gas infrastructure. Monitoring of technological processes in gas storages is carried out by GIS in production and observation wells. To ensure the tightness and safety of operation of a gas storage facility, it is necessary to develop a three-dimensional geological model that makes it possible to implement monitoring systems for ongoing processes in the upper control horizons and near-surface deposits within the mining allotment, to assess the current technogenic gas reserves and their distribution along the section.*

Purpose: *development of a three-dimensional geological model of the upper control horizons and near-surface deposits for monitoring the tightness and safety of operation of an underground natural gas storage.*

Objects: *system for monitoring the tightness of an underground gas storage: the upper control horizons and near-surface deposits of an underground gas storage within the boundaries of a mining allotment.*

Methods. *To build a three-dimensional geological model of the upper control horizons and near-surface deposits, the following were used: data from the geological study of the area and sediment stratigraphy; the contour of the stratigraphic surface of the top of the sedimentary sequence; digitized information from reserves calculation maps; coordinates of wells and reservoir intersections. Geological-physical, field and analytical data were used to create a digital filtration model. Stratigraphic referencing of target reflectors was made on the basis of well data. Models of the software «Navigator» were used, for geological modeling – «Designer of Geology» and for gas-dynamic modeling – «Designer of Models». On this basis, objects (points) were selected for modeling in the database structure based on the results of field, geological, geophysical information. The well location data was loaded in the Welltracks model format. To construct the structural surfaces of the horizons, files in the txt format are loaded into the programs, which are referred to as «Markers» within the software product.*

Results. *A structure was developed and an information field and geological database was created for the upper part of the section of the underground storage, taking into account the available geological, field and research information and data obtained during the drilling of production wells on the Khadum deposits and observation wells on the Khadum horizon and the green suite; a permanent geological and technological model of the upper control horizons and near-surface deposits of the underground storage facility (geological and gas-dynamic models) was developed; on the basis of the conducted geological constructions, an assessment of the technogenic volume of gas in the upper control horizons was carried out; a system was developed for monitoring the underground storage tightness by existing and planned wells to the upper control horizons and near-surface deposits.*

Key words:

Mining allotment, gas, well, underground gas storage, drilling, control horizons, deposits, monitoring, tightness, three-dimensional geological model.

REFERENCES

- Antipin Ya.O., Belkina V.A. Modeling of oil saturation of deposits taking into account the transition water-oil zone on the example of A field. *Territoriya neftegaz*, 2016, no. 5, pp. 22–29. In Rus.
- Bilibin S.I. *Tekhnologiya sozdaniya i soprovozhdeniya trekhmernykh tsifrovyykh geologicheskikh modeley neftegazovykh mestorozhdeniy*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Technology for creating and maintaining three-dimensional digital geological models of oil and gas fields. Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2010. 45 p.
- Svintsov M.V. *Povysheni proizvoditelnosti i ekspluatatsionnoy nadezhnosti skvazhin podzemnykh khranilishch gaza (na primere khadumskogo gorizonta Severo-Stavropolskogo PKHG)*. Diss. Cand. nauk [Improving the productivity and operational reliability of wells in underground gas storages (by example of the Khadum horizon of the Severo-Stavropol UGS. Cand. Diss.]. Stavropol, 2022. 127 p.
- GOST R 53839-2008. *Khranilishcha prirodnykh gazov podzemnyye. Pravila monitoringa pri sozdanii i ekspluatatsii* [State Standart 53839-2008. Underground natural gas storages. Monitor-

- ing rules during creation and operation]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 18 p.
5. Kashik A.S., Bilibin S.I., Gogonenkov G.N., Kirilov S.A. Novye tekhnologii pri postroenii tsifrovyykh geologicheskikh modeley mestorozhdeniy uglevodorodov [New technologies in the construction of digital geological models of hydrocarbon deposits]. *Tekhnologii TEK*, 2003, no. 3, pp. 12–17.
 6. Kuznetszova Ya.V. *Modelirovaniye neftenasyshchennosti plastov, zalezgayushchikh pod neftematerinskimi porodami (na primere verkhneyurskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri)*. Dis. Kand. nauk [Modeling of oil saturation of the layers lying under the oil source rocks (on the example of the Upper Jurassic deposits of Western Siberia)]. Cand. Diss.]. Tyumen, 2016. 163 p.
 7. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Lithological and paleogeographic conditions for the formation of oil fields with complex clay reservoirs (on the example of the Khadum-Batalpashinsky deposits). *Oil industry*, 2020, no. 5, pp. 25–30. In Rus.
 8. Jennings J.B. Capillary pressure techniques application to exploration and development geology. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 1987, vol. 71, pp. 1196–1209.
 9. Grishhenko M.A. Modern approaches to modeling the oil saturation of complex deposits in order to create hydrodynamic models. *Oil and gas geology*, 2008, no. 5, pp. 75–80. In Rus.
 10. Gasumov R.A., Gasumov E.R., Minchenko Yu.S. Features of creating underground reservoirs in depleted gas condensate fields. *Notes of the Mining Institute*, 2020, vol. 244, pp. 418–427. In Rus.
 11. Bolshakov Yu.Ya. *Netraditsionnye kapillyarno-ekranirovannyye zalezhi nefi i gaza v terrigennykh kollektorakh, usloviya ikh formirovaniya i vozmozhnosti poiskov*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Non-traditional capillary-shielded deposits of oil and gas in sandstone reservoirs, the conditions of their formation and the possibility of seeking. Dr. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 1987. 32 p.
 12. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Matematicheskie modeli rascheta filtratsionnykh protsessov na gazokondensatnykh mestorozhdeniyakh [Mathematical models for calculating filtration processes in gas condensate fields]. *O novoy paradigme razvitiya neftegazovoy geologii. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [On a new paradigm for the development of oil and gas geology. Proc. of the International Scientific and Practical Conference]. Kazan, September 2–4, 2020. Kazan, Ikhlas Publ. House, 2020. pp. 174–178.
 13. Zakrevskiy K.E. *Geologicheskoe 3D modelirovaniye* [Geological 3D modeling]. Moscow, OOO «IPCz Maska» Publ., 2009. 376 p.
 14. Zaboeva A.A. *Razrabotka metodik trekhmernogo geomodelirovaniya v usloviyakh neodnorodnosti i neravnomernosti geologo-geofizicheskoy informatsii (na primere mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri)*. Dis. Kand. nauk [Development of methods for three-dimensional geomodeling in conditions of heterogeneity and non-uniformity of geological and geophysical information (by example of deposits in Western Siberia)]. Cand. Diss.]. Tyumen, 2012. 167 p.
 15. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Features of digital filtration modeling of productive deposits. *The science. Innovation. Technology*, 2021, no. 2, pp. 7–28. In Rus.
 16. Rassas A., Ren S., Sun R., Zafar A., Moharam S., Guan Z., Ahmed A., Alomaisi M. Application of 3D reservoir geological model on Es1 formation, Block Nv32, Shenvis Oilfield, China. *Open Journal of Yangtze Oil and Gas*, 2020, vol. 5, no. 2, pp. 54–72.
 17. Xiang Li. Three-dimensional geological modeling methods and applications – a gold belt oilfield. *3rd International Conference on Management, Education, Information and Control (MEICI)*. Jinnan, China, 2015. pp. 3–10.
 18. Doych K.V. *Geostatisticheskoe modelirovaniye kollektorov* [Geostatistical modeling of reservoirs]. Moscow, Izhevsk, Computer research Institute Publ., 2011. 400 p.
 19. Gao Xingjun. Applied research of NMR movable fluid saturation in development of low permeability oilfield. *E3S Web of Conferences* 165, 01001, 2020, pp. 1–7.
 20. Kuiqian Ma. Techniques for improving the water-flooding of oil fields during the high water-cut stage. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies Nouvelles*, 2019, vol. 74, pp. 1–12.
 21. Juan Wang, Wei Liu, Wenwu Chen, Xuebin Ran, Yanfang Zhang, Gaochao Lin. An improved method for quantifying liquid saturation using transparent soil. *Advances in civil engineering*, 2019, vol. 1, pp. 1–11.
 22. Buckley S.E., Leverett M.C. Mechanism of fluid displacement in sands. *Transactions of The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 1942, vol. 146, pp. 107–116.
 23. Leverett M.C. Capillary behavior in porous solids. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 1941, vol. 142, pp. 148–152.
 24. Li Kewen. Theoretical development of the brooks-corey capillary pressure model from fractal modeling of porous media. *Symposium on Improved Oil Recovery*. Tulsa, Oklahoma, 17–21 April, 2004. pp. 3–9.
 25. Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V. Application of the Brooks–Corey model in the conditions of lower cretaceous deposits in terrigenous reservoirs of Western Siberia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 560, pp. 4–12.
 26. Elshahawi H., Fathy K., Hiekal S. Capillary pressure and rock wettability effects on wireline formation tester measurements. *IEOC 567121999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas, 1999. pp. 1–16.
 27. Gasumov R.A. Justification of the oil and gas saturated thickness and permeability of the Lower Maikop clayey reservoirs (on the example of the fields of the North Caucasus). *Oil and gas geology. Theory and practice*, 2018, vol. 13, no. 3. DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/31_2018
 28. Tikhomirova E.A., Sagirova L.R., Khaibullina K.Sh. A review on methods of oil saturation modelling using IRAP RMS. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 378, pp. 1–6.
 29. Gasumov R.A., Gasumov E.R., Minchenko Yu.S. Using the geological features of the Oxford deposits in the construction of a digital model of productive deposits. *Oil and gas geology. Theory and practice*, 2021, vol. 16, no. 4. In Rus. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/2021/41_2021.html (accessed 15 March 2022).

Received: 26 May 2022.

Information about the authors

- Ramiz A. Gasumov**, Dr. Sc., professor, North Caucasian Federal University; general director, JSC «SevKavNIPIgaz».
- Eldar R. Gasumov**, Cand. Sc., associate professor, Azerbaijan University of Oil and Industry; Doctoral Cand., Azerbaijan Technical University.
- Vilayat M. Veliev**, Dr. Sc., professor, Azerbaijan Technical University.
- Vagif A. Gasumov**, Dr. Sc., professor, Azerbaijan Technical University.
- Gazanfar S. Suleimanov**, Dr. Sc., professor, Azerbaijan University of Oil and Industry.
- Sadagat V. Ibrahimova**, Cand. Sc., associate professor, Azerbaijan University of Oil and Industry.