



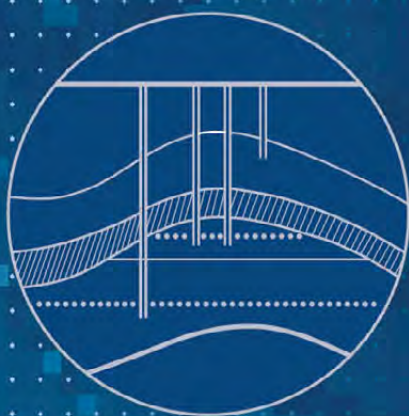
Российское
Газовое
Общество

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

РОССИЙСКОГО ГАЗОВОГО ОБЩЕСТВА

Союз организаций нефтегазовой отрасли «Российское газовое общество»

ПХГ



ТЕМА НОМЕРА:

«ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ ГАЗА: НАДЕЖНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ»

- * Строительство, обустройство, безопасная и эффективная эксплуатация подземных хранилищ природного газа
- * Подземное хранение водорода, водород-метановых смесей, «климатических» газов (CO_2) и т. д.: геологические и технологические особенности, перспективы
- * Проведение буровых и скважинных работ на ПХГ
- * Безопасность: экологическая, геоэкологическая, промышленная

По материалам Международной научно-практической конференции «Научного журнала Российского газового общества» «Подземное хранение газа: надежность и эффективность» в рамках XI Петербургского международного газового форума, Санкт-Петербург, сентябрь 2022



www.gazo.ru



2(38) 2023

Научный журнал Российского газового общества. 2023. № 2(38). С. 56–65

Научная статья
УДК 622.691.24
DOI: 10.55557/2412-6497-2023-2-56-65
EDN: MMFQVK

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЕТКИ МОДЕЛИ С НАЛИЧИЕМ ЯРКО ВЫРАЖЕННОЙ СЛОИСТОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ЗОНУ СМЕШЕНИЯ «ПРИРОДНЫЙ ГАЗ – СВЕРХКРИТИЧЕСКИЙ CO₂»

Кристина Валерьевна Дорохина
Евразийская патентная организация, Москва, Россия
KDorokhina@eapo.org

Аннотация. Одной из приоритетных задач является захоронение диоксида углерода в геологические структуры. Захоранивать CO₂ можно в существующие истощенные месторождения для повышения флюидоотдачи и подземные хранилища газа с целью частичного замещения буферного объема природного газа. Настоящая статья посвящена моделированию распространения фронта CO₂, находящегося в сверхкритическом агрегатном состоянии, по пласту-коллектору, насыщенному природным газом. Выявлены факторы, влияющие на точность прогнозных расчетов прорыва CO₂ в зону эксплуатационного фонда скважин.

Ключевые слова: диоксид углерода, модель, концентрация, плотность, вязкость, подземное хранение газа

Для цитирования: Дорохина К. В. Оценка влияния параметров сетки модели с наличием ярко выраженной слоистой неоднородности геологической структуры на зону смешения «природный газ – сверхкритический CO₂» // Научный журнал Российского газового общества. 2023. № 2(38). С. 56–65. <http://dx.doi.org/10.55557/2412-6497-2023-2-56-65>. EDN: MMFQVK.

© Дорохина К. В., 2023

© Dorokhina K. V., 2023

Scientific journal of the Russian gas society. 2023;2(38):56-65

Original article

UDC 622.691.24

DOI: 10.55557/2412-6497-2023-2-56-65

EDN: MMFQBK

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE MODEL GRID PARAMETERS WITH THE PRESENCE OF PRONOUNCED LAYERED HETEROGENEITY OF THE GEOLOGICAL STRUCTURE ON THE MIXING ZONE “NATURAL GAS – SUPERCRITICAL CO₂”

Kristina V. Dorokhina

Eurasian patent organization, Moscow, Russia

KDorokhina@eapo.org

Abstract. One of the priority tasks is the burial of carbon dioxide in geological structures. It is possible to bury CO₂ in existing depleted deposits to increase fluid recovery and underground gas storage facilities in order to partially replace the excess volume of natural gas. This article is devoted to modeling the propagation of a CO₂ front in a supercritical aggregate state through a reservoir saturated with natural gas. The factors influencing the accuracy of the forecast calculations of the CO₂ breakthrough into the zone of the operational fund of wells are revealed.

Keywords: carbon dioxide, model, concentration, density, viscosity, underground gas storage

For citation: Dorokhina K.V. Evaluation of the influence of the model grid parameters with the presence of pronounced layered heterogeneity of the geological structure on the mixing zone “natural gas – supercritical CO₂”. Scientific journal of the Russian gas society. 2023;2(38):56-65. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.55557/2412-6497-2023-2-56-65>. EDN: MMFQBK.

Введение

Сегодня в мире существует множество проектов по захоронению CO₂ в геологических структурах [1]. При захоронении CO₂ в истощенных газовых месторождениях и подземных хранилищах газа (ПХГ) возможно увеличить коэффициент газоотдачи объектов добычи и частично заместить буферный объем природного газа в ПХГ соответственно. В работе [2] показано, как неуглеводородные смеси, основным компонентом которых является CO₂, влияют на химический состав и прочностные свойства цементного камня крепи эксплуатационных скважин ПХГ в термобарических условиях, приближенных к пластовым, в случае прорыва неуглеводородной смеси в зону эксплуатационного фонда скважин. Для минимизации рисков прорыва CO₂ в работах [3, 4, 5, 6] доказано, что закачку диоксида углерода в пласт геологической структуры необходимо вести в сверхкритическом агрегатном состоянии, поскольку при его смешении с природным газом образуется наименьшая зона смешения «природный газ – сверхкритический CO₂».

При эксплуатации объектов добычи и ПХГ необходимо исключить возможность прорыва CO₂ в зону эксплуатационного фонда скважин, как при создании ПХГ Сэн-Клер-Сюр-Эпт с комбинированным объемом буферного газа (смесь неуглеводородных газов с метаном) французской компании «Газ де Франс» [7]. В настоящее время данную задачу можно решить с помощью 3D-моделирования, позволяющего численно про-

гнозировать эксплуатацию объектов добычи и ПХГ с учетом закачки сверхкритического CO_2 . Таким образом, необходимо оценить влияние выбора параметров сетки гидродинамической модели и наличия ярко выраженной слоистой неоднородности с включениями высокопроницаемых и непроницаемых пропластков на зону смешения «природный газ – сверхкритический CO_2 ».

Объекты исследования

Вариант 1. Было исследовано влияние дискретизации размера ячеек сетки на зону смешения «природный газ – сверхкритический CO_2 » при однородных ФЕС пласта-коллектора для исключения их влияния на исследуемый процесс.

Критерием выбора объекта подземного хранения газа являются пластовое давление и температура пласта, при которых CO_2 будет находиться в сверхкритическом состоянии. Объект представляет собой однородный пласт со следующими основными параметрами: пластовая температура – 33 °С, пластовое давление – 10 МПа, проницаемость пласта – 350 мД, пористость пласта – 25 %. Длина оси X = 200 м, Y = 200 м, Z = 20 м.

Было смоделировано несколько вариантов закачки сверхкритического CO_2 (30 суток):

- количество ячеек по X = 100 шт., Y = 100 шт., Z = 20 шт.;
- количество ячеек по X = 50 шт., Y = 50 шт., Z = 10 шт.;
- количество ячеек по X = 25 шт., Y = 25 шт., Z = 5 шт.;
- количество ячеек по X = 100 шт., Y = 100 шт., Z = 20 шт., поворот осей X, Y, Z на 30 °;
- количество ячеек по X = 100 шт., Y = 100 шт., Z = 20 шт., поворот осей X, Y, Z на 45 °;
- количество ячеек по X = 100 шт., Y = 100 шт., Z = 20 шт., локальное измельчение сетки в области зоны смешения «природный газ – сверхкритический CO_2 ».

Вариант 2. Для оценки влияния эффекта upscaling модели на переходную зону «природный газ – сверхкритический CO_2 » необходимо создать куб с высокой слоистой неоднородностью по проницаемости и наличием непроницаемых пропластков. Объект представляет собой неоднородный пласт по проницаемости со следующими основными параметрами: пластовая температура – 33 °С, пластовое давление – 10 МПа, средняя проницаемость пласта – 350 мД с наличием высокопроницаемых и непроницаемых пропластков, средняя пористость пласта – 25 %. Длина оси X = 200 м, Y = 200 м, Z = 20 м. Проницаемость по оси X равна проницаемости по оси Y.

Было смоделировано несколько вариантов закачки сверхкритического CO_2 (30 суток):

- количество ячеек по X = 100 шт., Y = 100 шт., Z = 20 шт.;
- количество ячеек по X = 25 шт., Y = 25 шт., Z = 5 шт. с учетом upscaling.

Результаты проведенных численных исследований по варианту 1

Исходя из общей закономерности «чем меньше шаг, тем точнее результат» [8], примем за базовый вариант сетку с большим количеством ячеек. Таким образом, длина ячейки по X = 2 м, Y = 2 м, Z = 1 м.

Результаты распределения плотности, вязкости и концентрации сверхкритического CO_2 представлены на **рисунках 1–3**.

Из **рисунка 1** видно, что распространение CO_2 идет преимущественно по подошве пласта-коллектора вследствие сегрегационного разделения, поскольку осредненная плотность сверхкритического CO_2 в 5 раз выше

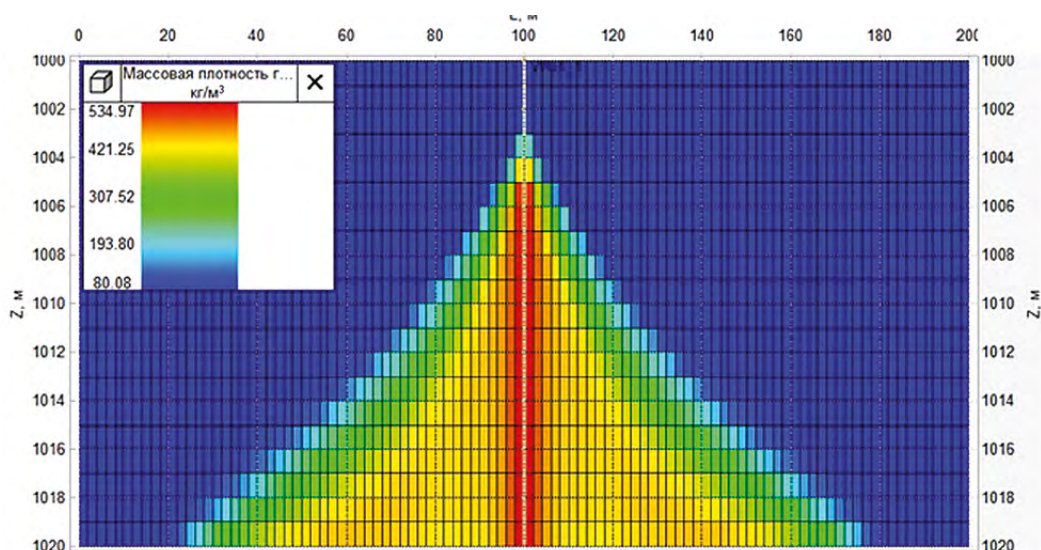


Рисунок 1 – Распределение плотности сверхкритического CO_2 в пласте-коллекторе

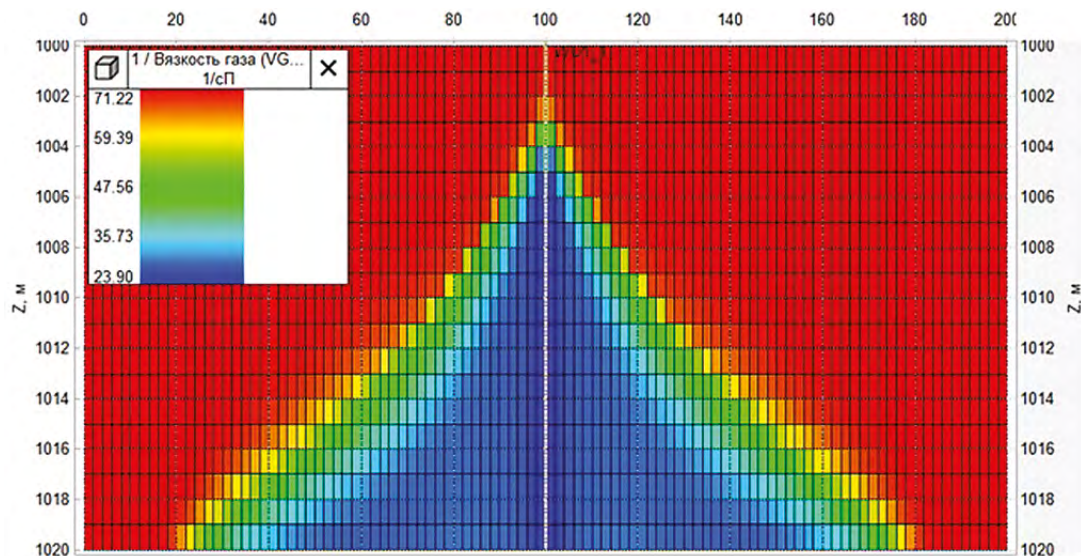


Рисунок 2 – Распределение вязкости сверхкритического CO₂ в пласте-коллекторе

метана. В зоне максимального осредненного насыщения сверхкритического CO₂ (76 % сверхкритического CO₂ и 24 % метана) плотность равна 441,2 кг/м³, далее плотность снижается за счет увеличения концентрации метана и стремится к плотности, равной 80,2 кг/м³, характерной для текущих термобарических условий.

Из **рисунка 2** видно, что вязкость сверхкритического CO₂ в 2,2 раза выше метана, поэтому скорость фильтрации сверхкритического CO₂ ниже метана. В зоне максимального осредненного насыщения сверхкритического CO₂ (76 % сверхкритического CO₂ и 24 % метана) вязкость равна 32,4 1/сПз (0,0309 мПа·с), далее вязкость снижается за счет увеличения концентрации метана и стремится к вязкости, равной 71,2 1/сПз (0,014 мПа·с), характерной для текущих термобарических условий. Метан будет быстрее фильтроваться к добывающему фонду скважин.

Из **рисунка 3** видно, что при комплексном учете всех параметров концентрация сверхкритического CO₂ равна 0 при X = 92 метра.

Примем данное решение за максимально приближенное к истинному решению в связи с ограниченными возможностями вычислительной техники.

Далее представлены результаты расчетов с количеством ячеек по X = 50 шт., Y = 50 шт., Z = 10 шт. и X = 25 шт., Y = 25 шт., Z = 5 шт. Таким образом, длина ячейки по X = 4 м, Y = 4 м, Z = 2 м и X = 8 м, Y = 8 м, Z = 4 м соответственно. Произошло увеличение шага дискретизации (в 2 и 4 раза), а также объема и площади поперечного сечения ячейки.

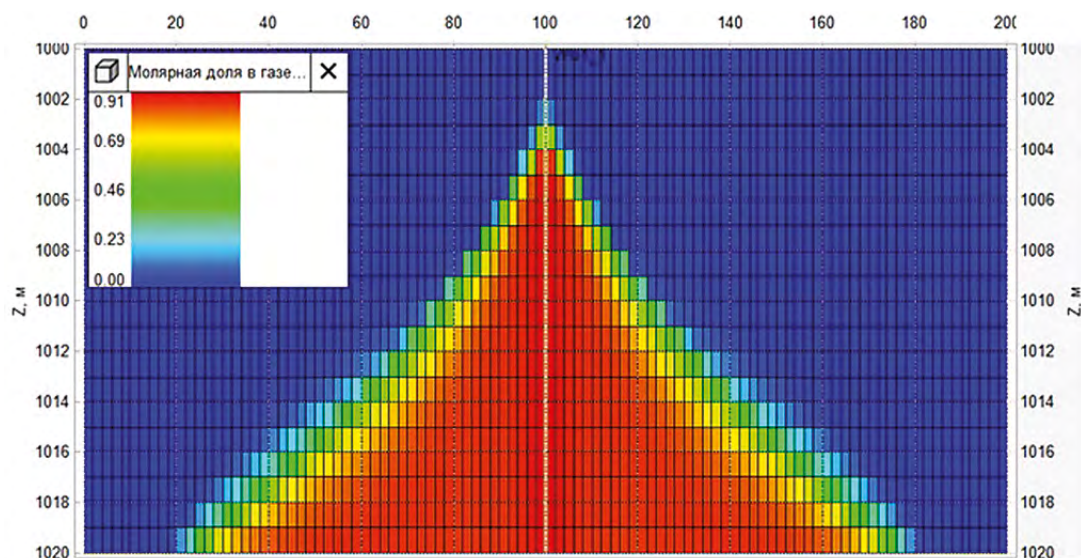


Рисунок 3 – Распределение концентрации сверхкритического CO₂ в пласте-коллекторе

Результаты распределения осредненных значений плотности, вязкости и концентрации сверхкритического CO_2 на ось X, а также их сопоставление с базовым и вторым вариантами представлены на **рисунках 4–6**.

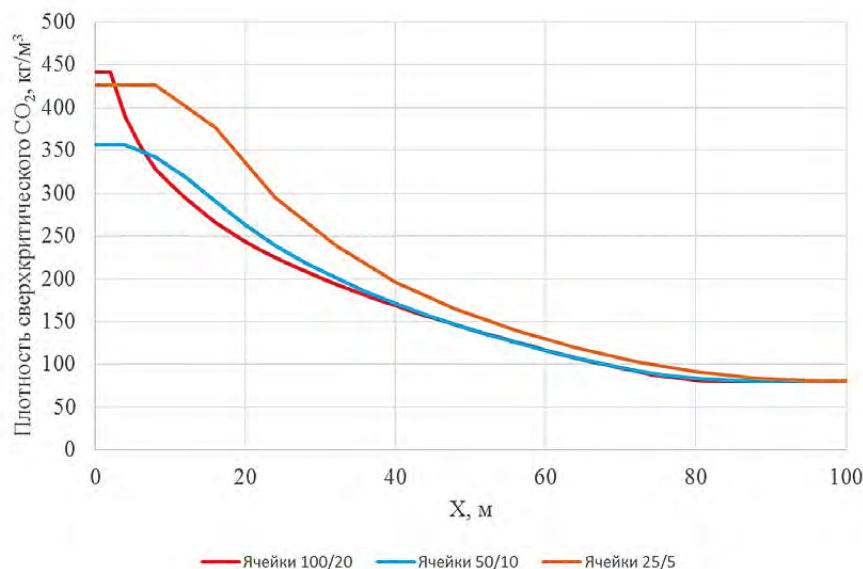


Рисунок 4 – Осредненное распределение плотности сверхкритического CO_2 в пласте-коллекторе

Из **рисунка 4** видно, что осредненная плотность сверхкритического CO_2 по третьему варианту расчета выше базового и второго вариантов расчетов. Самое высокое значение погрешности прослеживается в околоскважинной зоне от 0 до 50 метров, далее решение стремится к базовому с большей погрешностью относительно второго варианта расчета.

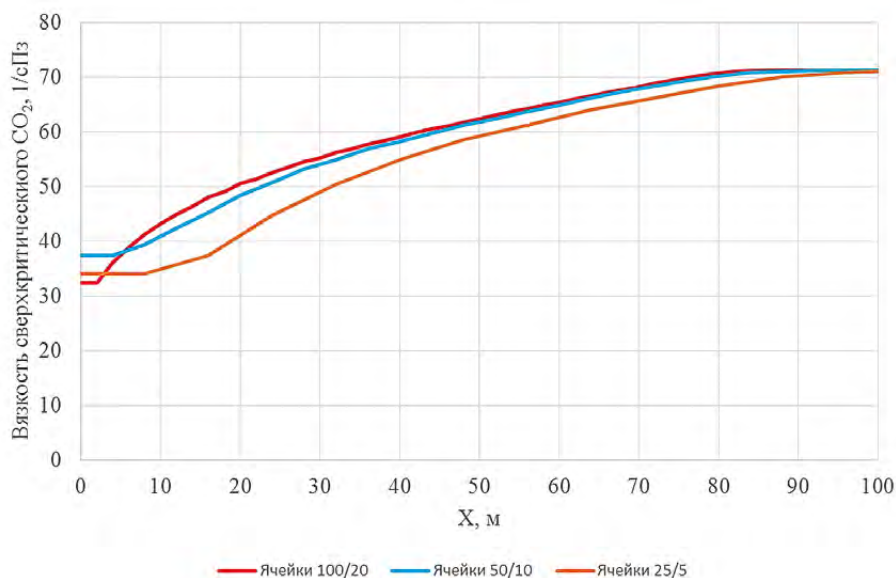


Рисунок 5 – Осредненное распределение вязкости сверхкритического CO_2 в пласте-коллекторе

Вязкость сверхкритического CO_2 по третьему варианту меньше по сравнению с базовым и вторым вариантами расчетов (**рисунком 5**). Самое высокое значение погрешности прослеживается в околоскважинной зоне от 0 до 50 метров, далее решение стремится к базовому с большей погрешностью относительно второго варианта расчета.

Из **рисунка 6** на с. 61 видно, что в третьем варианте фронт распространения сверхкритического CO_2 опережает базовый и второй варианты расчета. Таким образом, при комплексном учете всех параметров большее укрупнение сетки ведет к увеличению зоны смешения «сверхкритический CO_2 – метан» и, как следствие, более раннему прорыву CO_2 к зоне эксплуатационного фонда скважин. Концентрация сверхкритического CO_2 равна 0 при X = свыше 100 метров, что более чем на 8 метров и 4 метра выше относительно базового и второго вариантов

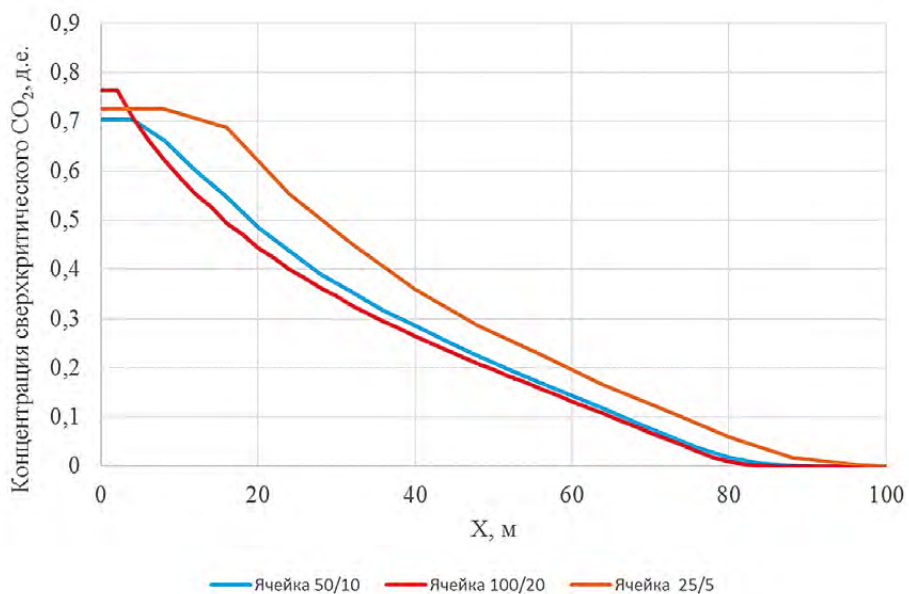


Рисунок 6 – Осредненное распределение концентрации сверхкритического CO₂ в пласте-коллекторе

соответственно. Таким образом, дискретизация шага ячеек до $X = 8$ м, $Y = 8$ м, $Z = 4$ м является недопустимой в связи с большим значением погрешности расчета зоны смешения «природный газ – сверхкритический CO₂».

В четвертом и пятом вариантах повернем сетку базового варианта на 30° и 45° для исследования влияния разворота сетки на зону смешения «природный газ – сверхкритический CO₂». Нагнетательная скважина CO₂ в результате поворота сетки на 45° разместилась на грани куба. Результаты распределения осредненной концентрации сверхкритического CO₂ на ось X представлены на **рисунке 7**.

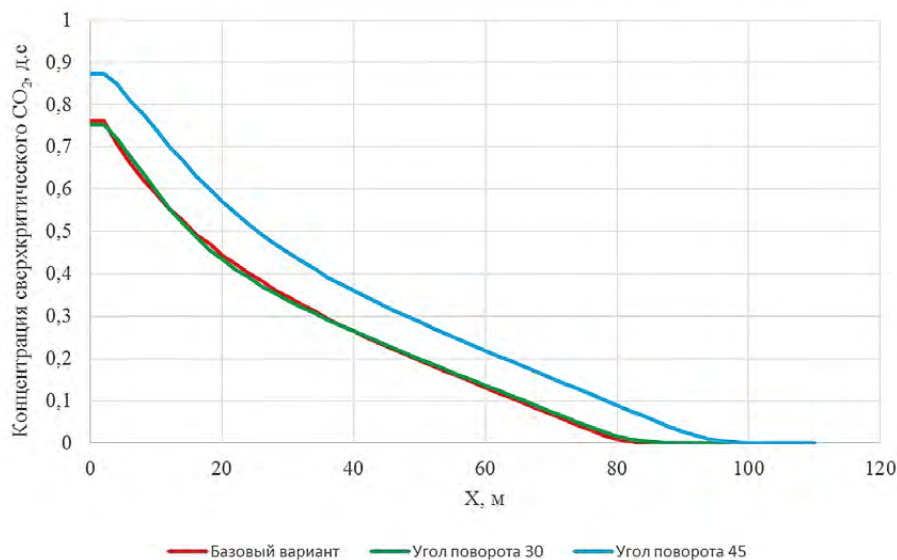


Рисунок 7 – Осредненное распределение концентрации сверхкритического CO₂ в пласте-коллекторе

Из рисунка 7 видно, что при комплексном учете всех параметров концентрация сверхкритического CO₂ равна 0 при $X = 110$ метров, что на 18 метров больше базового варианта расчета и на 12 метров – четвертого варианта соответственно. При этом при пятом варианте расчета прорыв CO₂ произошел на большее расстояние, поскольку нагнетательная скважина в результате поворота сетки разместилась на ребре куба, что привело к изменению конфигурации фронта распространения CO₂ по пласту (ограничение границей пласта). По оси Z зона следов CO₂ по пятому варианту соответствует отметке 1014 метров, по четвертому – 1011 метров. Таким образом, в случае ограниченного пласта-коллектора (оптимизация скорости расчетов) фильтрация CO₂ идет некорректно. При от-

сутствии пласта (расположение нагнетательной скважины на грани куба в данном случае) идет процесс «накопления» CO_2 по оси Z, а также увеличение объема фильтрации CO_2 в направлении предполагаемого эксплуатационного фонда скважин.

Таким образом, ориентационный эффект сетки приводит к преимущественному течению вдоль линий сетки, препятствующему в данном случае вертикальному перемешиванию, вызванному численной дисперсией [9]. Из-за этого явления прорыв сверхкритического CO_2 в базовом варианте будет ранним, а в четвертом – поздним (в случае бесконечного пласта-коллектора). При ограниченном пласте-коллекторе в случае размещения нагнетательных скважин на ГВК необходимо ограничивать геологическую структуру таким образом, чтобы за контуром ГВК также был пласт для учета фильтрации CO_2 при вытеснении пластовой воды и, как следствие, локальном расширении контура ГВК.

Рассмотрим шестой вариант с количеством ячеек по X = 100 шт., Y = 100 шт., Z = 20 шт. и наличием неравномерной сетки с локальным измельчением. Таким образом, длина ячейки в зоне локального измельчения по X = 1 м, Y = 1 м, Z = 1 м. В связи с чем произошло уменьшение шага дискретизации в 2 раза, а также объема и площади поперечного сечения ячеек в области локального измельчения соответственно. Результаты распределения концентрации сверхкритического CO_2 представлены на **рисунке 8**.

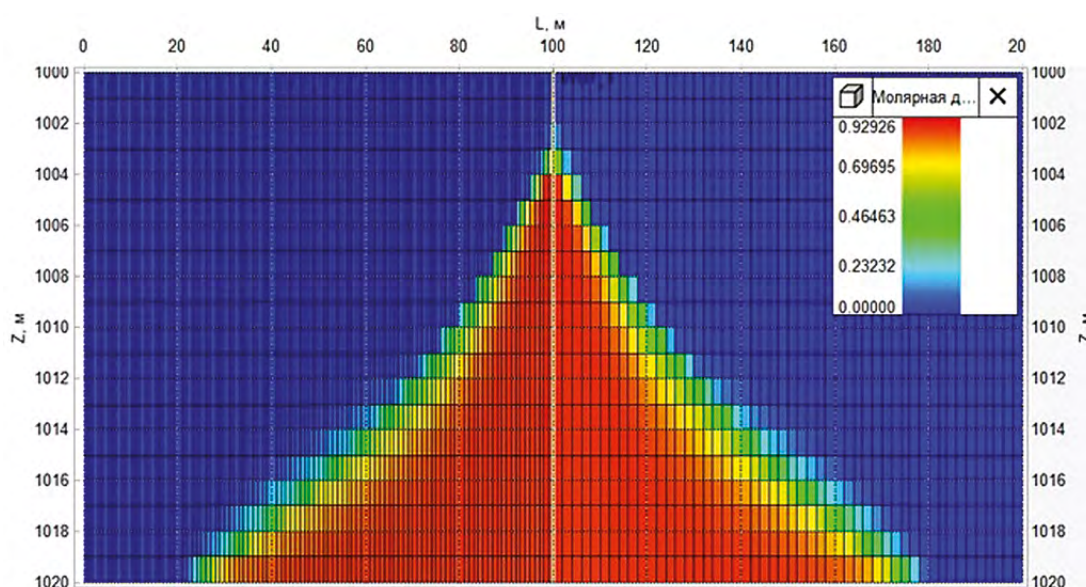


Рисунок 8 – Распределение концентрации сверхкритического CO_2 в пласте-коллекторе

Из рисунков 3 и 8 видно, что при учете локального измельчения сетки концентрация CO_2 равна нулю при X = 88 метров, что на 2 метра меньше базового варианта. Таким образом, в области анализа зоны смешения необходимо использование неравномерной сетки с локальным измельчением в зоне смешения.

Анализируя полученные решения, можно сделать следующие выводы:

- увеличение шага дискретизации ячейки ведет к завышению значения переходной зоны «природный газ – сверхкритический CO_2 ». Поэтому точность расчетов переходной зоны «природный газ – сверхкритический CO_2 » снижается;
- по результатам проведенных исследований максимально допустимая длина ячеек по X = 4 м, Y = 4 м, Z = 2 м. При превышении данных значений прорыв CO_2 в зону эксплуатационного фонда скважин будет происходить намного раньше, что ведет к увеличению погрешности расчетов;
- ориентационный эффект сетки приводит к раннему прорыву сверхкритического CO_2 в зону эксплуатационного фонда скважин в результате влияния численной дисперсии в случае бесконечного пласта-коллектора;
- при ограниченном пласте-коллекторе в случае размещения скважин на ГВК необходимо ограничивать геологическую структуру таким образом, чтобы за контуром ГВК также был участок пласта для учета фильтрации CO_2 при вытеснении пластовой воды и, как следствие, локальном расширении контура ГВК. Данные мероприятия увеличат продолжительность расчетов, но при этом позволят не завышать объем фильтрации CO_2 в зону эксплуатационного фонда скважин;
- для повышения точности расчетов необходимо в зоне закачки CO_2 , а также по фронту его распространения и в зоне эксплуатационного фонда скважин, расположенных в окрестности распространения CO_2 , детализировать сетку. Рекомендуется использовать неравномерные сетки при моделировании закачки CO_2 (композиционное моделирование) с использованием ПДГТМ.

Результаты проведенных численных исследований по варианту 2

Согласно проведенному выше анализу, примем за базовый вариант сетку с большим количеством ячеек. Таким образом, длина ячейки по X = 2 м, Y = 2 м, Z = 1 м. Разрезы куба проницаемости по X представлены на **рисунках 9** (базовый) и **10** (*upscaling*).

Из рисунков 9 и 10 можно сделать вывод, что огрубление сетки полностью скорректировало структуру пласта-коллектора.

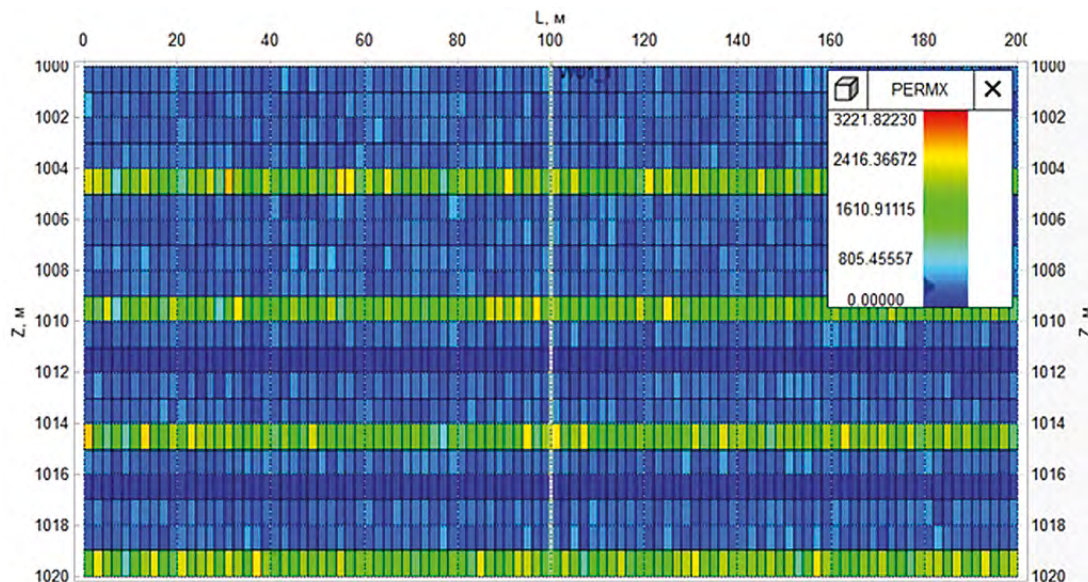


Рисунок 9 – Разрез начального куба проницаемости по оси X

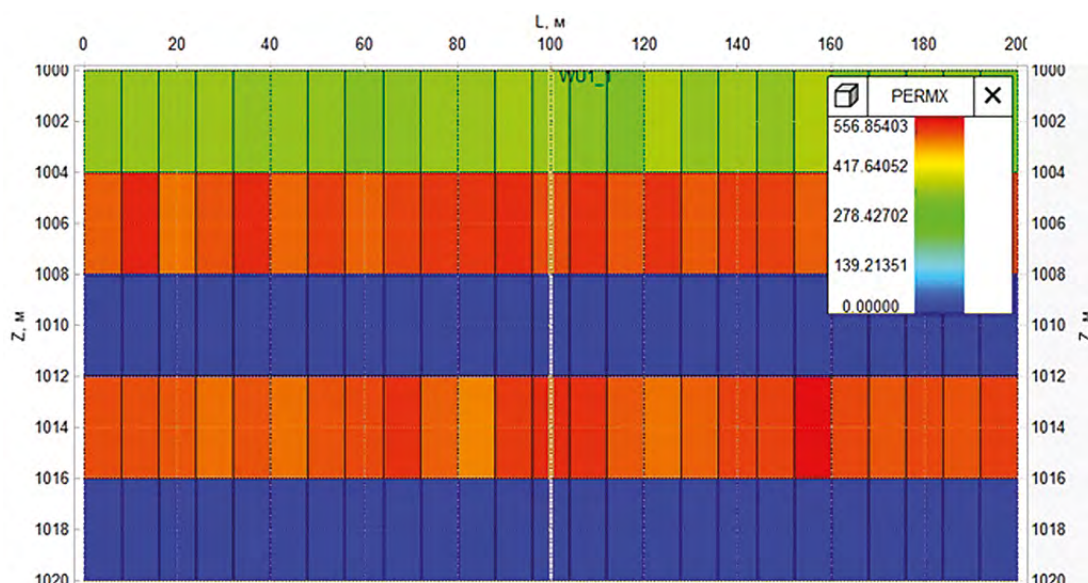


Рисунок 10 – Огрубленный разрез начального куба проницаемости по оси X

Результаты распределения концентрации сверхкритического CO₂ представлены на **рисунках 11** и **12**, см. с. 64. Из рисунков 11 и 12 видно, что погрешность расчетов возрастает. Для точного прогнозирования зоны смешения «природный газ – сверхкритический CO₂» с учетом ярко выраженной слоистой неоднородности с включениями высокопроницаемых и непроницаемых пропластков рекомендуется использовать сетку с минимальным шагом дискретизации в области распространения CO₂ как по латерали, так и по вертикали.

Результаты проведенных исследований показали следующее:

- при *upscaling* сетки неоднородного пласта с учетом ярко выраженной слоистой неоднородности по проницаемости с включениями высокопроницаемых и непроницаемых пропластков, помимо дискретизации параметров ячейки, также существенное влияние на зону смешения «сверхкритический CO₂ – CH₄» оказывает огрубление проницаемости. Поэтому точность расчетов переходной зоны «сверхкритический CO₂ – CH₄» снижается;
- при *upscaling* длины ячеек шага по X = 8 м, Y = 8 м, Z = 4 м сверхкритический CO₂ начинает распространяться по кровле пласта-коллектора, что противоречит расчетам базового варианта;

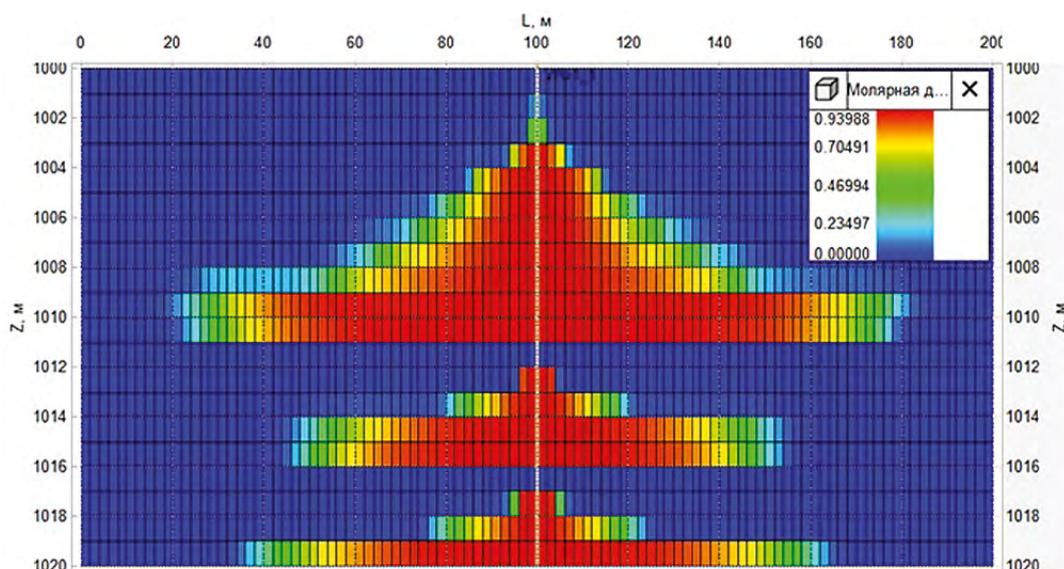


Рисунок 11 – Распределение концентрации сверхкритического CO_2 в пласте-коллекторе в базовом варианте

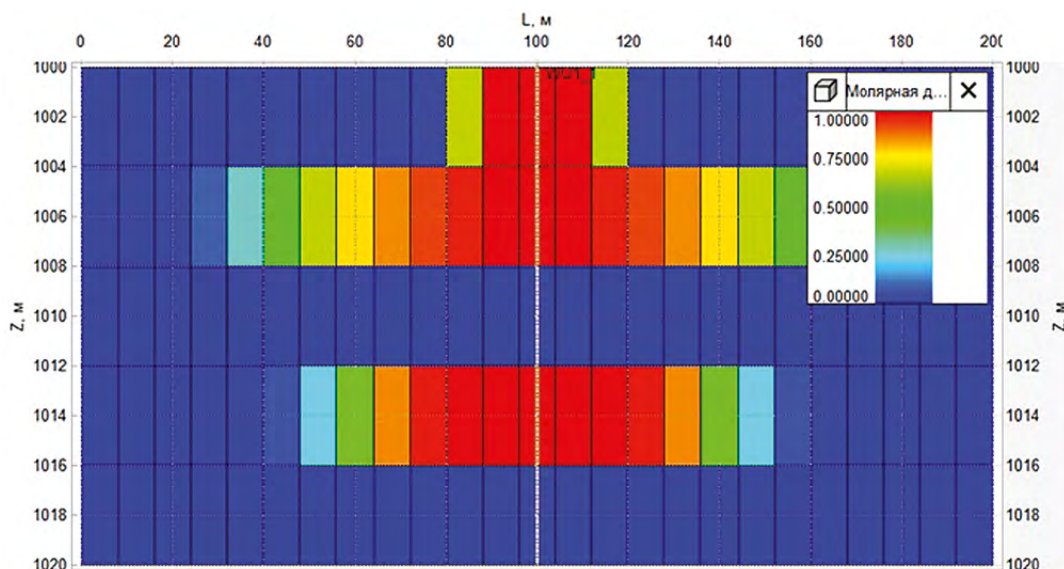


Рисунок 12 – Распределение концентрации сверхкритического CO_2 в пласте-коллекторе с учетом upscaling

- при upscaling сетки неоднородного пласта с учетом ярко выраженной слоистой неоднородности по проницаемости с включениями высокопроницаемых и непроницаемых пропластков на фильтрацию будет оказывать влияние тип огрубления (среднее арифметическое, среднее геометрическое, среднее гармоническое, среднее степенное и т. д.). При наличии непроницаемых пропластков среднее арифметическое огрубление сделает их проницаемыми, среднее геометрическое увеличит толщину непроницаемого пропластка. Таким образом, тип огрубления необходимо обосновывать исходя из решаемой задачи;
- по результатам проведенных исследований делать upscaling сетки не рекомендуется в связи со значительным повышением погрешности расчетов;
- при наличии высокопроницаемых пропластков необходимо использование детальной сетки, поскольку в случае ее огрубления потеря данных пропластков приведет к завышению объема закачанного CO_2 , так как его прорыв при реальной эксплуатации объекта захоронения наступит раньше, чем по данным прогнозных расчетов. В результате экономические показатели проекта будут снижены кратно;
- для повышения точности расчетов необходимо в зоне закачки CO_2 , а также по фронту его распространения и в зоне эксплуатационного фонда скважин, расположенных в окрестности распространения CO_2 , детализировать сетку. Рекомендуется использовать неравномерные сетки при моделировании закачки CO_2 (композиционное моделирование) с использованием ПДГТМ.

Практическая ценность работы заключается в обосновании выбора основных параметров сетки модели с наличием ярко выраженной слоистой неоднородности геологической структуры, влияющих на зону смешения «природный газ – сверхкритический CO₂», с целью повышения точности прогнозных расчетов эксплуатации потенциальных объектов размещения CO₂ и, как следствие, подтверждения рентабельности использования данной технологии.

Заключение

Проведенные исследования показали, что на точность прогнозных расчетов основных показателей эксплуатации объекта захоронения CO₂ и, как следствие, экономическую эффективность климатических проектов огромное влияние оказывают параметры сетки модели, обоснованный выбор которых позволит достоверно учитывать наличие высокопроницаемых и непроницаемых пропластков, влияющих на формирование фронта распространения CO₂ и его прорывы в зону эксплуатационного фонда скважин.

.....

Список источников

1. Хан С. А. Анализ мировых проектов по захоронению углекислого газа // Георесурсы. 2010. № 4(36). С. 55–62.
2. Хан С. А., Дорохин В. Г., Бутов К. А., Оводов С. О., Гусаков А. В. Экспериментальная оценка воздействия диоксида углерода и смесей неуглеводородных газов, входящих в состав дымовых газов, на изменение химического состава и скорость разрушения цементного камня эксплуатационных скважин ПХГ // Научный журнал Российского газового общества. 2022. № 3(35). С. 86–95.
3. Дмитриевский А. Н., Хан С. А., Мойжиш Я., Семенов О. Г., Хвостова В. Ю. Сокращение объемов буферного газа при создании газохранилищ в месторождениях углекислого газа // Газовая промышленность. 2009. № 9. С. 37–40.
4. Хан С. А., Дорохин В. Г., Бондаренко Н. П. Использование особенностей агрегатных состояний двуокиси углерода для замещения части буферного объема подземных хранилищ газа // Газовая промышленность. 2016. № 4. С. 30–35.
5. Хан С. А., Дорохин В. Г. Анализ поведения сверхкритического CO₂ и N₂ в пластовых условиях при частичном замещении объемов буферного газа на примере Кушчевского ПХГ // Газовая промышленность. 2016. № 7–8. С. 50–54.
6. Хан С. А., Гарайшин А. С. и др. Исследование возможности частичного замещения буферного объема газа на диоксид углерода на ПХГ // Территория Нефтегаз. 2015. № 5. С. 18–21.
7. Tek M. R. Underground Storage of Natural Gas Theory and Practice. Kluwer Academic Publishers, 1988. P. 371–383.
8. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем / пер. с англ. М.: Недра, 1982. 407 с.
9. Герни Б. Кричлоу. Современная разработка нефтяных месторождений – проблемы моделирования / пер. с англ. М: Недра, 1979. 303 с.

References

1. Khan S. A. Analysis of global carbon dioxide disposal projects // Georesources. 2010. No. 4(36). P. 55–62 (In Russ.).
2. Khan S. A., Dorokhin V. G., Butov K. A., Ovodov S. O., Gusakov A. V. Experimental assessment of the impact of carbon dioxide and mixtures of non-hydrocarbon gases included in the composition of flue gases on the change in chemical composition and the rate of destruction of cement stone of UGS wells // Scientific Journal of the Russian Gas Society. 2022. No. 3(35). P. 86–95 (In Russ.).
3. Dmitriyevskiy A. N., Khan S. A., Moyzhish Ya., Semenov O. G., Khvostova V. Yu. Decreasing cushion gas volumes for storages under construction in carbon dioxide cavities // Gas Industry. 2009. No. 9. P. 37–40 (In Russ.).
4. Khan S. A., Dorokhin V. G., Bondarenko N. P. Using the features of the aggregate states of carbon dioxide to replace part of cushion gas volumes of underground gas storage // Gas Industry. 2016. No. 4. P. 30–35 (In Russ.).
5. Khan S. A., Dorokhin V. G. Analysis of the behavior of supercritical CO₂ and N₂ in reservoir conditions with partial replacement of cushion gas volumes on the Kushchevsky UGS // Gas Industry. 2016. No. 7–8. P. 50–54 (In Russ.).
6. Khan S. A., Garaishin A. S., et al. Investigation of partial replacement of cushion gas volumes with carbon dioxide at UGS // Territory Neftegaz. 2015. No. 5. P. 18–21 (In Russ.).
7. Tek M. R. Underground Storage of Natural Gas Theory and Practice. Kluwer Academic Publishers, 1988. P. 371–383.
8. Aziz H., Settari E. Mathematical modeling of reservoir systems / Trans. from English. M.: Nedra, 1982. 407 p. (In Russ.).
9. Henry B. Critchlow. Modern reservoir engineering – a simulation approach / Trans. from English. M.: Nedra, 1979. 303 p. (In Russ.).

Информация об авторе: **Кристина Валерьевна Дорохина**, ведущий эксперт

Information about the author: **Kristina V. Dorokhina**, leading expert

Статья поступила в редакцию 09.02.2023; одобрена после рецензирования 14.02.2023; принята к публикации 17.02.2023. The article was submitted 09.02.2023; approved after reviewing 14.02.2023; accepted for publication 17.02.2023.