



ТЕМА НОМЕРА
MAIN TOPIC

**Освоение
газовых
месторождений
России**
Russian
Gas Fields
Development

ГЕОЛОГИЯ РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТИРОВКА

ДОБЫЧА ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ ЭНЕРГЕТИКА

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ ЭКОНОМИКА

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ДИАГНОСТИКА ГЕОФИЗИКА

АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 622.691.24

Дорохина К.В., Евразийская патентная организация, Москва, Россия

Численное исследование ограничения прорыва диоксида углерода в зону эксплуатационного фонда скважин

Ключевые слова: диоксид углерода, модель, концентрация, пена, заводнение, подземное хранение газа

Одной из приоритетных задач является захоронение диоксида углерода в геологические структуры. Захоранивать CO_2 можно в существующие истощенные месторождения для повышения флюидоотдачи и подземные хранилища газа с целью частичного замещения буферного объема природного газа. Настоящая статья посвящена исследованию ограничения прорыва сверхкритического CO_2 в зону эксплуатационного фонда скважин за счет создания пенных барьеров и частичного заводнения пласта-коллектора. Показано влияние процесса адсорбции пены породой пласта, периода распада пены и процесса заводнения залежи на прорыв сверхкритического CO_2 в зону эксплуатационного фонда скважин. Даны рекомендации по выбору раствора ПАВ для длительного поддержания пены в пласте-коллекторе.

Сегодня в мире существует множество проектов по захоронению CO_2 в геологических структурах [1]. При размещении CO_2 в подземных хранилищах газа (ПХГ) возможно также частично заместить буферный объем природного газа [2–5]. При закачке CO_2 в метановый пласт будет происходить смешение двух компонентов газов, в случае наличия ярко выраженной неоднородности пласта возможны прорывы CO_2 по высокопроницаемым пропласткам в зону эксплуатационного фонда скважин. Таким образом, необходимо создать техническое решение для ограничения прорыва CO_2 в зону эксплуатационных скважин.

В работах [6, 7] показано, что при создании внутрипластовых экранов с помощью дисперсных систем можно контролировать перетоки газа из объекта ПХГ и приток пластовой жидкости к забоям эксплуатационных скважин. Внутрипластовые экраны имеют различную проницаемость для газа в зависимости от исходных параметров процесса создания экранов: концентрации синергетической композиции поверхностно-активного вещества (ПАВ), газонасыщенности пласта, его геологических особенностей и др. Поэтому для ограничения прорыва сверхкритического CO_2 в зону эксплуатационного фонда скважин возможно использование данной технологии с учетом ее совершенствования.

Постановка задачи

Критерием выбора объекта подземного хранения газа являются пластовое давление, температура пласта, при которых CO₂ будет находиться в сверхкритическом состоянии. Объект представляет собой неоднородный пласт с ярко-выраженной слоистой неоднородностью со следующими основными параметрами: пластовая температура 33 °С, пластовое давление 10 МПа, средняя проницаемость пласта 350 мД, средняя пористость пласта 25%. Длина оси X = 200 м, Y = 200 м, Z = 20 м.

Расчеты проводились в программном комплексе ООО «РФД» tNavigator. В симуляторе на базе технологии моделирования трассеров реализована опция, позволяющая моделировать закачку в пласт пенообразующих веществ. Пена, заданная как трассер, может быть ассоциирована как с газовым, так и с водным компонентом. Поскольку закачиваемый раствор создается на основании пластовой воды с некой концентрацией ПАВ, примем инициатором распространения пены воду. Количество пены в блоке подчиняется следующему закону сохранения (в случае водного компонента):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{VN_w C_f}{\rho_{w(sc)}} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(V \rho_r C_f^a \frac{1-\varphi}{\varphi} \right) = \sum F_w \frac{C_f}{\rho_{w(sc)}} + \frac{Q_w C_f}{\rho_{w(sc)}} - \frac{\lambda(S_w, S_g) VN_w C_f}{\rho_{w(sc)}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{VN_w C_f}{\rho_{w(sc)}} \right) - \text{свободная пена};$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(V \rho_r C_f^a \frac{1-\varphi}{\varphi} \right) - \text{адсорбированная пена};$$

$$\sum F_g \frac{C_f}{\rho_{w(sc)}} - \text{внос/вынос потоком};$$

$$\frac{Q_w C_f}{\rho_{w(sc)}} - \text{закачка/отбор};$$

$$\frac{\lambda(S_w, S_g) VN_g C_f}{\rho_{w(sc)}} - \text{распад пены}.$$

где C_f – концентрация пены;

$\rho_{w(sc)}$ – плотности воды в стандартных условиях;

ρ_r – плотность породы;

V – поровый объём блока;

N_w – молярная плотность воды;

C_f^a – концентрация адсорбированной пены;

φ – пористость;

F_w – массовый приток/отток воды из соседних блоков;

Q_w – массовый приток/отток воды за счёт скважины;

$\lambda(S_w, S_g)$ – коэффициент скорости распада, зависящий от водо- и газонасыщенности.

Таким образом, по вышеописанным законам будет проведено численное исследование влияния пенообразующих компонентов на прорыв сверхкритического CO_2 в зону эксплуатационного фонда скважин. При этом темп закачки CO_2 – 100 тыс. $\text{м}^3/\text{сут.}$ (скважина WU30_2), темп отбора природного газа – 150 тыс. $\text{м}^3/\text{сут.}$ (скважина WU30_1). Также подбирается пенообразующий ПАВ таким образом, чтобы предельная концентрация пены в каждом блоке сетки составляла 0,6 д.е. Объем полученного раствора закачивается с производительностью 200 $\text{м}^3/\text{сут.}$ (скважина WU1_1, расположенная вдоль фронта распространения CO_2) в течение трех суток. Далее вспенивание раствора осуществляется за счет прокачки природного газа в объеме 3600 м^3 [7] в течение следующих суток. Моделируемый период составил 30 суток.

Было рассмотрено несколько вариантов эксплуатации предполагаемого объекта размещения CO_2 :

- закачка сверхкритического CO_2 с последующим отбором природного газа;
- оценка влияния пены на изменение относительных фазовых проницаемостей по газу на прорыв CO_2 ;
- оценка влияния процесса адсорбции пены породой и периода полураспада пены на прорыв CO_2 ;
- оценка влияния сплошного барьера пены и процесса заводнения участка пласта-коллектора на прорыв CO_2 .

Результаты проведенных численных исследований по варианту 1

Результаты распределения концентрации сверхкритического CO_2 по варианту 1 представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что прорыв CO_2 к эксплуатационной скважине идет преимущественно по высокопроницаемым пропласткам, а поскольку CO_2 тяжелее метана, его фильтрация идет активнее по подошве пласта. Пропластки, расположенные на глубине 1011 и 1017 метров, непроницаемы.

На рис. 2 представлено распределение концентрации добываемого пластового флюида.

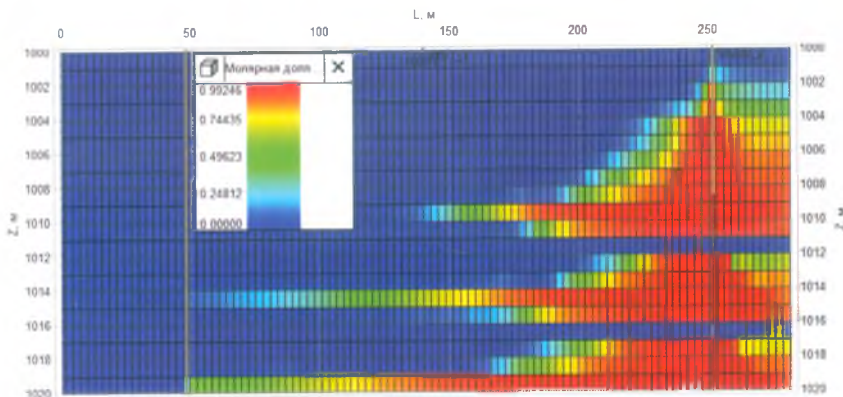


Рис. 1. Распределение концентрации сверхкритического CO_2 в пласте-коллекторе

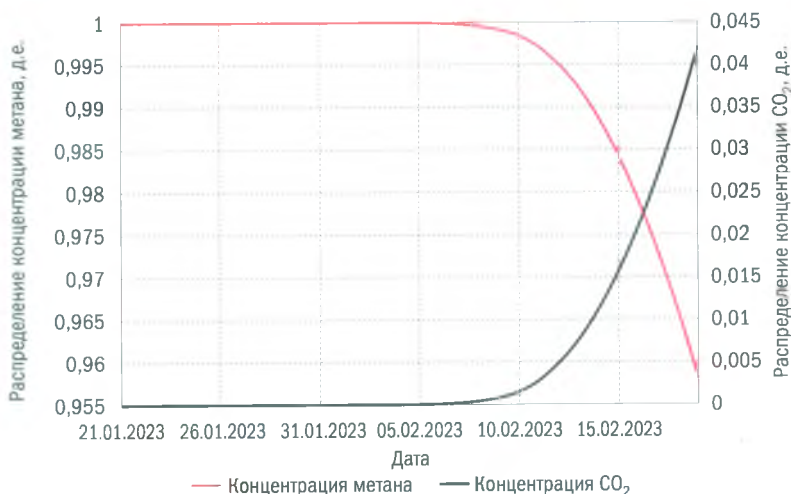


Рис. 2. Распределение концентрации сверхкритического CO₂ и метана в добываемой продукции

Из рис. 2 видно, что на конец моделируемого интервала концентрация CO₂ в скважинной продукции равна 0,04184 д.е., метана – 0,95816 д.е. соответственно. В результате расчета данного варианта установлены основные параметры (концентрации компонентов в добываемой скважинной продукции, фронт распространения CO₂), по которым будет оцениваться эффект снижения прорыва CO₂ в зону эксплуатационного фонда скважин.

Результаты проведенных численных исследований по варианту 2

Во втором варианте на интервале прорыва CO₂ бурится нагнетательная скважина для закачки раствора ПАВ по фронту распространения CO₂. Результаты распределения пены и представлены на рис. 3.

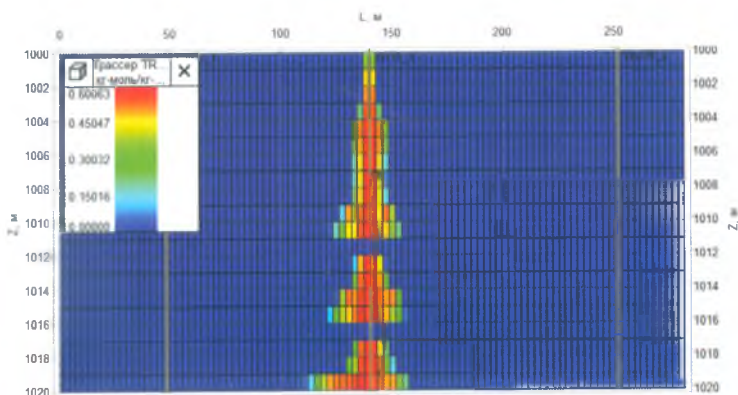


Рис. 3. Распределение концентрации пены в пласте-коллекторе

На рис. 4–6 представлены осредненные распределения концентрации сверхкритического CO_2 с учетом закачки пены и без нее на плоскость по трем промежуткам слоев: от 1 до 11 слоя (12 слой непроницаемый пропласток), от 13 до 16 слоя (17 слой непроницаемый пропласток) и от 18 до 20 слоя.

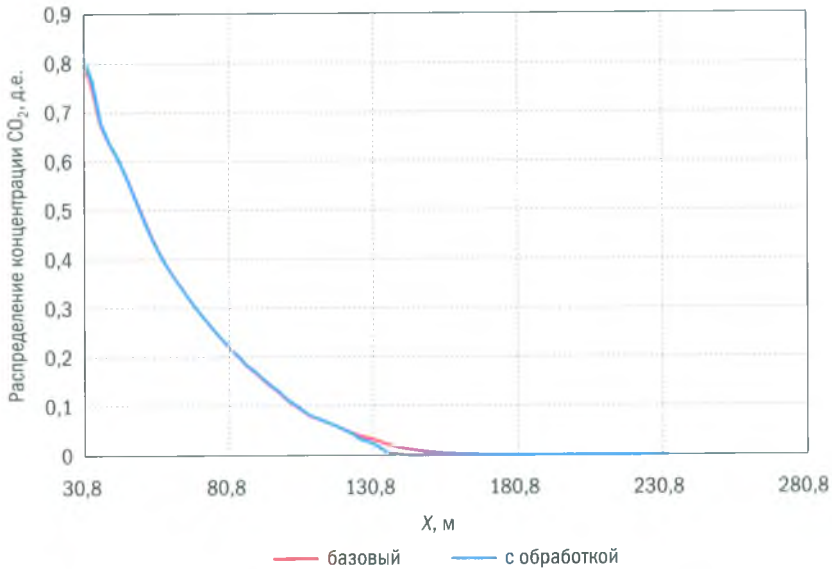


Рис. 4. Осредненное распределение концентрации сверхкритического CO_2 от 1-го до 11-го слоя пласта-коллектора

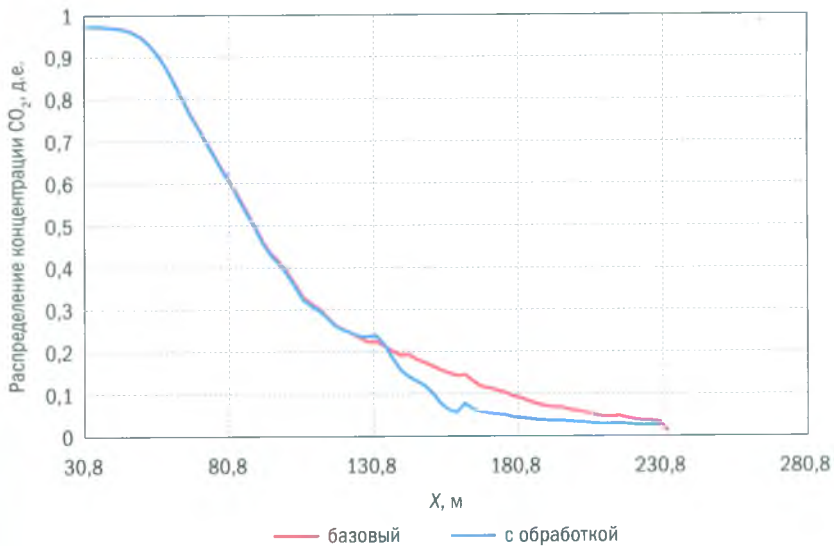


Рис. 5. Осредненное распределение концентрации сверхкритического CO_2 от 13-го до 16-го слоя пласта-коллектора

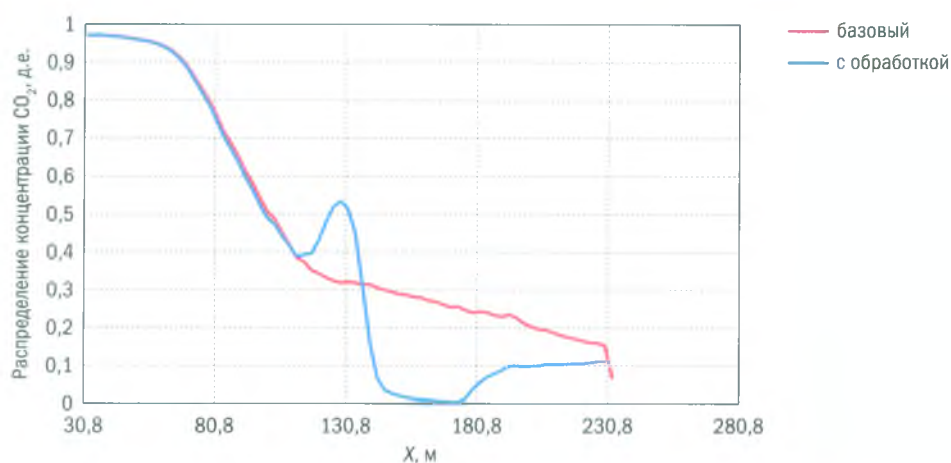


Рис. 6. Осредненное распределение концентрации сверхкритического CO_2 от 18-го до 20-го слоя пласта-коллектора

Из рис. 4 и 6 видно, что при $X = 130,8$ метров (расположение нагнетательной скважины) начинается снижение концентрации CO_2 в результате закачки пены (снижение ОФП по газу). Скачок концентрации связан с аккумулярованием CO_2 в окрестности нагнетательной скважины WU1_1 из-за перетока CO_2 из 20 в 19 и 18 слою по Z. В связи с этим на рис. 7 прослеживается разрыв насыщенности на интервале «нагнетательная скважина по CO_2 – раствор ПАВ». Из рис. 7 также видно, что CO_2 фильтруется, обгибая скважину WU1_1 в районах отсутствия пены.

Из рис. 3–14 видно, что на конец моделируемого интервала концентрация CO_2 в скважинной продукции равна 0,03421 д.е., метана – 0,9659 д.е. соответственно. Таким образом, из данного рисунка видно, что концентрация CO_2 в скважинной продукции снизилась на 0,007626 д.е.

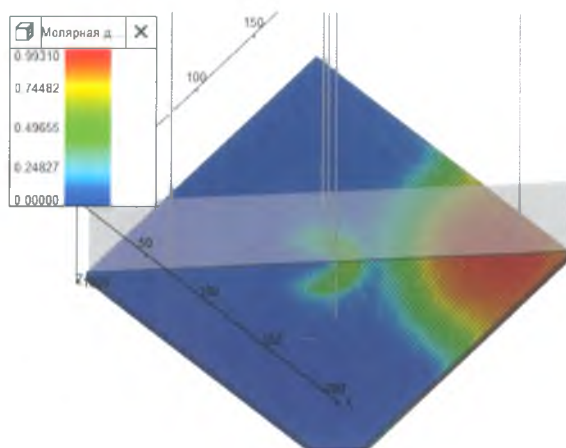


Рис. 7. Распределение концентрации сверхкритического CO_2 по 19-му слою пласта-коллектора

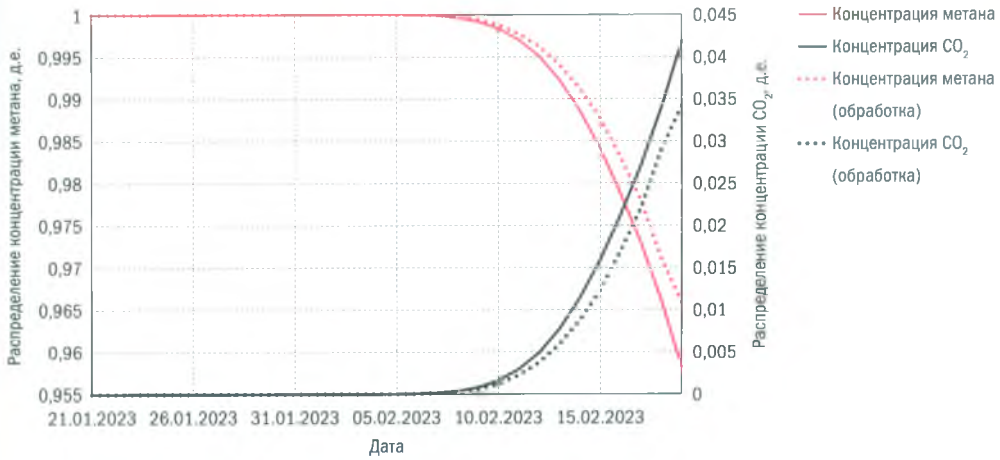


Рис. 8. Распределение концентрации сверхкритического CO₂ и метана в добываемой продукции

Из данных расчетов можно сделать вывод, что для предотвращения прорыва CO₂ необходимо подбирать состав ПАВ таким образом, чтобы образованная пена максимально снижала ОФП по газу.

Результаты проведенных численных исследований по варианту 3

В третьем варианте учитывается процесс адсорбции пены породой пласта-коллектора. Максимальное значение концентрации адсорбированной пены в 2-х вариантах расчета равно 0,1 и 0,00001 д.е. Таким образом, рассматривается пена с высоким и низким показателем адсорбции. Результаты распределения осредненной концентрации CO₂ представлены на рисунках 9–11 при разных коэффициентах адсорбции.

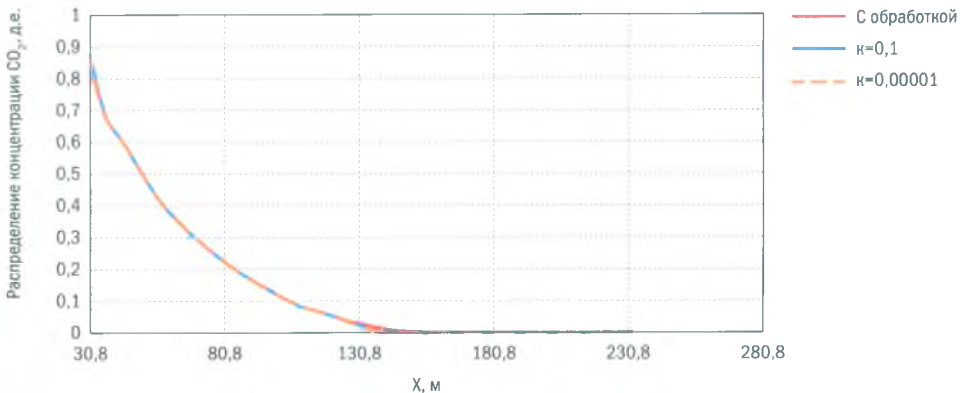


Рис. 9. Осредненное распределение концентрации сверхкритического CO₂ от 1-го до 11-го слоя пласта-коллектора

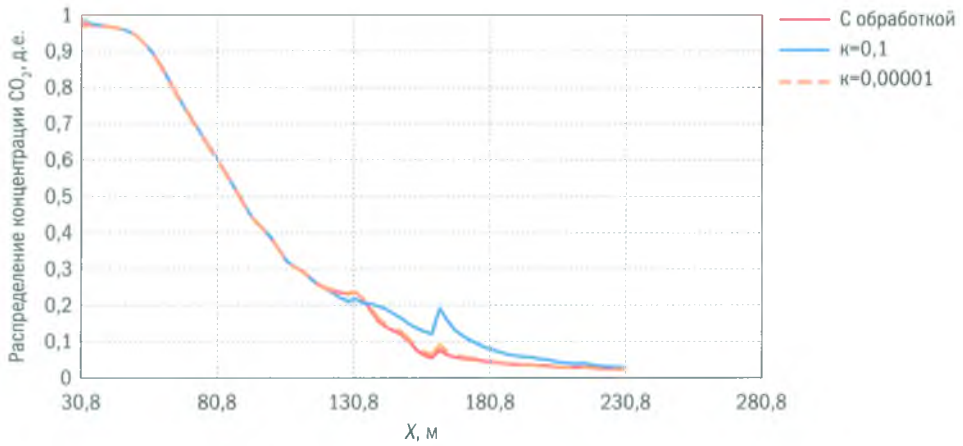


Рис. 10. Осредненное распределение концентрации сверхкритического CO_2 от 13-го до 16-го слоя пласта-коллектора

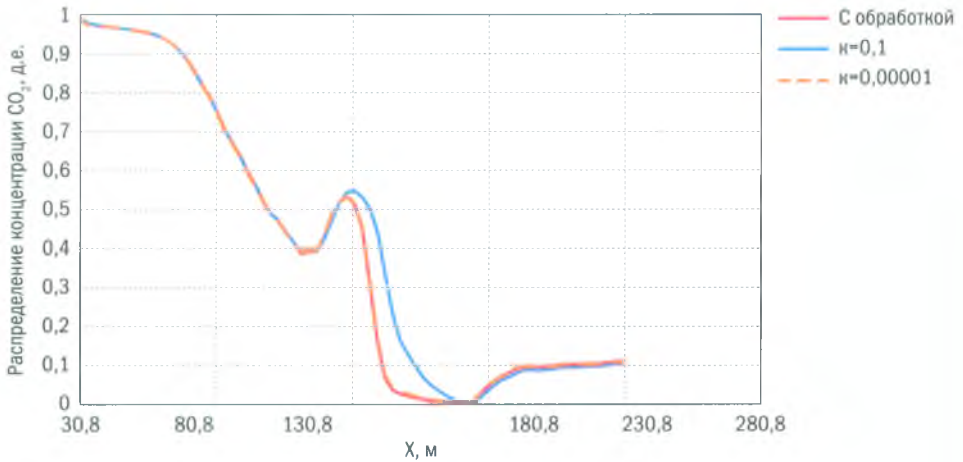


Рис. 11. Осредненное распределение концентрации сверхкритического CO_2 от 18-го до 20-го слоя пласта-коллектора

Из рис. 9–11 также видно, что в результате процесса адсорбции пены породой пласта-коллектора в интервале обработки ПАВ призабойной зоны скважины происходит рост концентрации CO_2 при высокой степени адсорбции пены породой. При снижении адсорбционной способности решение системы уравнений стремится к варианту «с обработкой». Таким образом, необходимо подбирать ПАВ с низкими адсорбционными свойствами, чтобы повысить стойкость пены.

При этом помимо процесса адсорбции пены породой пласта-коллектора при $\kappa=0,00001$ д.е. необходимо учитывать период полураспада пены. В данном варианте он равен 30 суткам. Распад пены идет как в газовой среде в свободном виде, так и в адсорбированной части пены. Результаты распределения концентрации пены представлены на рис. 12.

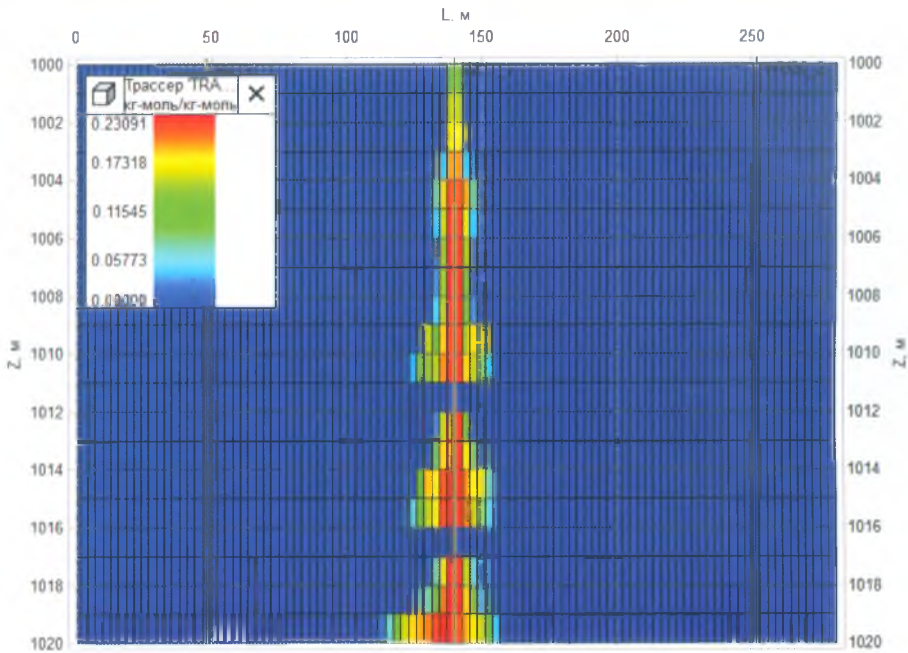


Рис. 12. Распределение концентрации пены в пласте-коллекторе

Из рис. 12 видно, что концентрация пены в пласте резко снижается, что влияет на фильтрацию CO_2 . Таким образом, чем больше период полураспада, тем дольше пена сохраняется в пласте.

Длительное существование пены в пласте обеспечивается низкой адсорбцией и высоким периодом полураспада, в следующем варианте будет исследована возможность создания сплошного барьера пены и воды.

Результаты проведенных численных исследований по варианту 4

В четвертом варианте рассматривается создание сплошного экрана пены и заводнения участка пласта тремя скважинами для предотвращения возможности прорыва CO_2 . Необходимо обеспечить максимальную непрерывность экрана по нижним пропласткам пласта-коллектора, поскольку под действием сегрегационного разделения активная фильтрация CO_2 идет по 15 и 20 слоям соответственно, но в том же моделируемом временном отрезке и идентичными параметрами работы скважин. Моделирование пены происходит с учетом абсорбции и периода полураспада. Результаты распределения осредненной концентрации CO_2 представлены на рис. 13–15.

Из рис. 13–15 видно, что в интервале закачки раствора ПАВ и воды сильнее снижает фильтрацию CO_2 раствор ПАВ. Далее на отметке 180,8 м происходит слияние кривых, и процесс фильтрация CO_2 становится идентичным по 2-м вариантам (вода, раствор ПАВ), поскольку CO_2 мигрирует по участкам, где пена и вода отсутствуют.

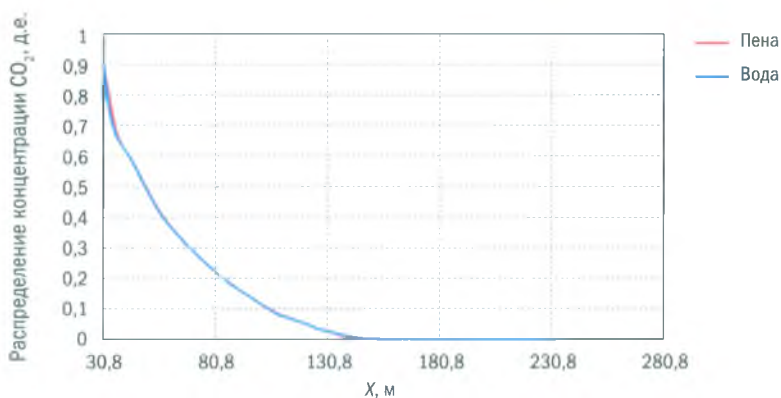


Рис. 13. Осредненное распределение концентрации сверхкритического CO₂ от 1-го до 11-го слоя пласта-коллектора

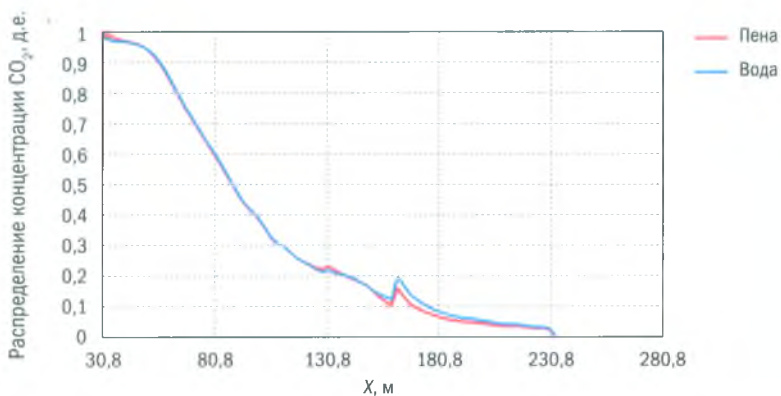


Рис. 14. Осредненное распределение концентрации сверхкритического CO₂ от 13-го до 16-го слоя пласта-коллектора

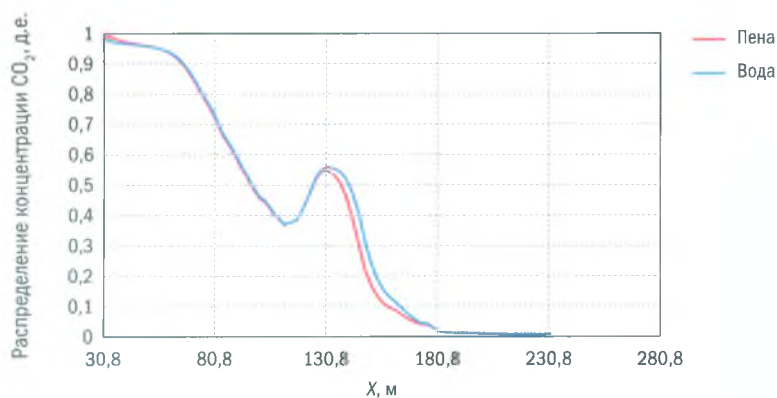


Рис. 15. Осредненное распределение концентрации сверхкритического CO₂ от 18-го до 20-го слоя пласта-коллектора

Заключение

Таким образом, анализируя полученные решения, можно сделать следующие выводы:

- для предотвращения прорыва CO_2 к зоне эксплуатационного фонда скважин необходимо подбирать раствор ПАВ так, чтобы образовавшаяся пена максимально снижала ОФП по CO_2 , исключала возможность процесса адсорбции пены породой и максимально долго не распадалась в пласте;

- для предотвращения прорыва CO_2 к зоне эксплуатационного фонда скважин также рекомендуется использовать частичное заводнение залежи, поскольку техническая реализация данного решения проще (пену необходимо восстанавливать) и экономически рентабельнее. При наличии водоносных горизонтов в объекте размещения CO_2 рекомендуется использовать пластовую воду данного горизонта;

- для увеличения эксплуатации объекта размещения диоксида углерода с термобарическими параметрами, соответствующими сверхкритическому агрегатному состоянию, без примеси CO_2 в скважинной продукции необходимо создавать непрерывные пенные (водные) экраны в нижней части пласта-коллектора, поскольку фильтрация сверхкритического CO_2 идет преимущественно по подошве пласта из-за процессов сегрегационного разделения;

- для увеличения эксплуатации объекта размещения диоксида углерода без примеси CO_2 в скважинной продукции в случае его прорыва по подошве пласта необходимо изолировать приток из нижней части пласта, оставив перфорированным участок, расположенный ближе к кровле пласта-коллектора;

- расчеты подтвердили необходимые требования, предъявляемые к водному раствору ПАВ, для длительного поддержания пены в пласте. Результаты данных вычислений будут являться базовыми для разработки режима эксплуатации объекта размещения CO_2 в случае создания пенных или водяных барьеров по фронту распространения CO_2 .

Библиография

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. Каримов М.Ф. Эксплуатация подземных хранилищ газа. М., Недра, 1981. 248 с.

6. Хан С. А., Каримов М.Ф., Муллағалиева Л.М., Дудникова Ю.К. и др. Опыт создания протяженного пластового экрана из дисперсных систем при подземном хранении газа в водоносных пластах // Газовая промышленность. 2015. № 8. С. 70-74.
7. Хан С. А., Дудникова Ю.К., Каримов М.Ф., Муллағалиева Л.М. Оценка влияния внутрипластового экрана из дисперсных систем на снижение перетоков газа // Газовая промышленность. 2015. № 10. С. 8-12.