

С. В. Яскевич^{1,2}, И. И. Фадеева^{1}*

Метод температурного мониторинга целостности скважины

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

* e-mail: FadeevaII@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Мониторинг объектов захоронения CO₂ является неотъемлемой частью их функционирования. Самым потенциально значимым источником утечек являются скважины (нагнетательные, мониторинговые, унаследованные), пересекающие объект захоронения. Численный анализ температурных аномалий при перетоках, возникающих в результате утечки CO₂ через зоны нарушения цементной оболочки обсаженной скважины позволил определить минимальные объемы утечек, которые могут быть зарегистрированы при помощи оптоволоконного распределенного датчика температуры (DTS), расположенного в затрубном пространстве (зацементированном). Моделировались разные параметры утечек: температура и скорость утекающего CO₂. При оценке минимального обнаруживаемого на разных глубинах объема утечки были составлены зависимости охлаждения этих датчиков от времени. Время, когда наблюдалась температура ниже референтной более чем на точность измерения (-0.1°C), считалось моментом детектирования утечки на обозначенном датчике. Оценки времен детектирования утечек далее пересчитывались в их минимально детектируемые объемы при условии, что средняя плотность и скорость течения CO₂ по трещине не менялась.

Ключевые слова: мониторинг скважин, датчики DTS, утечки сверхкритического CO₂, численное моделирование температурного состояния скважины

S. V. Yaskevich^{1,2}, I. I. Fadeeva^{1}*

Temperature monitoring method for well integrity

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

² Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

* e-mail: FadeevaII@ipgg.sbras.ru

Abstract. Monitoring of CO₂ disposal facilities is an integral part of their operation. The most potentially significant source of leaks are wells (injection, monitoring, legacy). Numerical analysis of temperature anomalies during cross-flows resulting from CO₂ leakage through zones of violation of the cement shell of a cased well made it possible to determine the minimum volumes of leaks that can be recorded by DTS sensors located in the well shell at different depths. Various leak parameters were modeled: temperature and speed of leaking CO₂. When assessing the minimum leak volume detectable by DTS sensors at different depths, the cooling of these sensors as a function of time was compiled. The time when the temperature was observed below the reference temperature by more than the DTS measurement accuracy (-0.1°C) was considered the moment a leak was detected at the designated sensor. Estimates of leak detection times were further recalculated into their minimum detectable volumes of detectable leaks of supercritical CO₂, provided that the average density and flow rate of CO₂ along the crack did not change.

Keywords: well monitoring, DTS sensors, supercritical CO₂ leaks, numerical modeling of well temperature conditions.

Введение

Мониторинг теплового состояния пробуренной скважины выполняется для наблюдения за температурными эффектами при её бурении и эксплуатации, например, для обнаружения заколонных перетоков по вертикальным трещинам с оценкой размеров возникших трещин. Скважинный термометр должен иметь чувствительность 0.1°C и меньше, что важно при изучении относительного изменения температуры в скважине. В стандартных геофизических исследованиях температурные измерения проводятся либо с использованием косы из температурных датчиков с отдельным измерительным прибором на поверхности, либо с использованием интегрированного в другие каротажные приборы термометра [1], при этом измерения обеспечиваются спускоподъемными операциями, что никак не совместимо с задачей непрерывного мониторинга.

Прогресс в технологии измерения температуры с использованием оптоволоконных систем значительно уменьшил проблему пространственно-временной дискретности наблюдений и значительно расширил область применения этой технологии. Оптоволокно для измерений температуры устанавливают на этапе строительства скважины, и дискретность измерений зависит от возможностей подключаемого к оптоволокну интегратора, находящегося на поверхности скважины. Система DTS состоит из оптоволоконного кабеля, вдоль которого производятся измерения и специального измерительного устройства – интегратора. На данный момент существует несколько методов измерения температуры, включая микроструктурированные оптические волокна (MOF) [2, 3], волокна с брэгговскими решетками [4], обычные одномодовые, многомодовые и пластиковые оптические волокна (POF) [5], которые применяются при наблюдениях в скважинах. Температурные системы DTS обычно обеспечивают измерения температуры вдоль всего кабеля с шагом от 1 метра и с точность измерений ~0.1 °C. При установке оптоволоконных кабелей за обсадной колонной, их упаковывают в трубку из нержавеющей стали, которую крепят снаружи к обсадной колонне. Основные преимущества систем DTS:

- а) получение данных в реальном времени;
- б) обеспечение непрерывного мониторинга по всей длине ствола скважины;
- в) невосприимчивость к электромагнитным помехам;
- г) устойчивость к высоким температурам.

Одной из крупнейших проблем в проектах геологического захоронения CO₂ является потенциальная утечка закачанного в резервуар-хранилище CO₂ (в условиях резервуара CO₂ находится при температуре и давлении свыше 31.1 °C и 7.4 МПа – сверхкритический CO₂) в регионы с уязвимыми ресурсами, например, в водоносные горизонты с питьевой водой, посредством различных путей утечки. Существует два основных сценария утечки [6]:

- а) Утечка через произвольную скважину, либо саму нагнетательную скважину;
- б) Утечка через субвертикальные разломы или трещины.

Можно заключить, что измерения температуры распределенными оптоволоконными системами представляет собой актуальную задачу, для успешной реализации которой необходимо температурное моделирование, чему и посвящена данная работа. В работе мы задаемся цилиндрической трещиной шириной 0.2 мм и длиной 100 м, моделирующей отслоение цемента от ствола скважины, по которой утекает CO₂ с заданной температурой и скоростью утечки.

Описание модели

Рассматривается осесимметричная задача (рис. 1), на оси находится скважина внутренним радиусом 8 см, толщиной стальной стенки 1 см и толщиной трещины 0.2 мм, расположенной снаружи вдоль стенки скважины, по которой снизу-вверх утекает закачанный ранее в скважину при более высоком давлении CO₂ с низкой, относительно породы, температурой (T_{CO_2}).

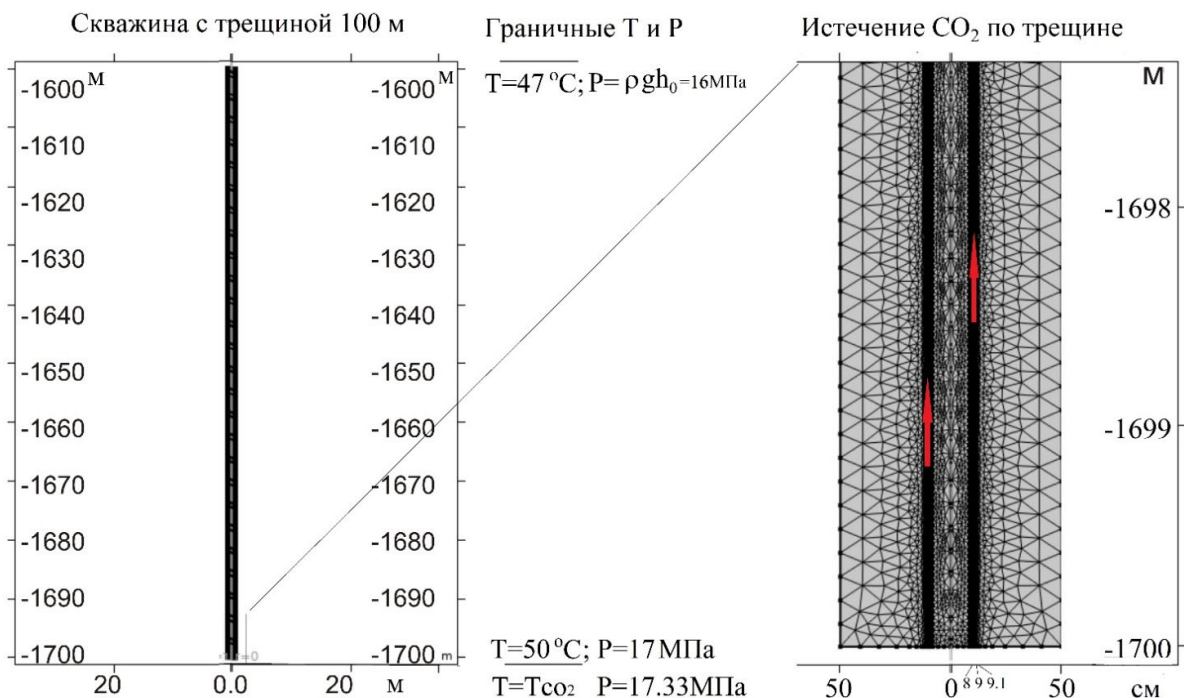


Рис. 1. Схема скважины (внутренний $r_0=8$ см и внешний $r_1=9$ см радиус) в породе (радиус 50 см) с трещиной (толщина $w=0.2$ мм) вдоль стенки скважины, по которой происходит утечка CO₂ (как показано красными стрелками) с сеткой для численной задачи

В начальный момент времени скважина находится в породе с температурным градиентом $[T(h)=47\text{ }^{\circ}\text{C}+0.03\cdot(h-h_0)]$ и гидростатическим давлением $[P(h)=16\text{ МПа}+\rho g(h-h_0)]$ для всех r . На глубине $h_0=-1600$ м, $T=47\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P=16$ МПа; на глубине $h=-1700$ м, $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P=17$ МПа (см. рис. 1).

С момента закачки CO₂ в нижнюю часть пласта - на глубину 1700 м, его температура приняла температуру закачанного T_{CO₂}, и в результате возникновения трещины шириной 0.2 мм и избыточного давления газа CO₂ (0.33 МПа), он утекал вверх со скоростью, которую оценивали согласно закону Дарси.

$$u = \frac{1}{8\mu} \left(2r_1^2 + (r_2^2 - r_1^2) \left(1 - \frac{1}{\ln(r_2 / r_1)} \right) \right) \nabla p.$$

Где $r_2=r_1+w=90.2$ мм, μ – вязкость сверхкритического CO₂ (табл. 1). Рассматривали три варианта температуры, входящего в трещину CO₂ и нижнего пласта T_{CO₂}: 43, 45 и 47 °С, и использовались следующие скорости течения CO₂ по трещине u : 1.0, 0.7, 0.4, 0.1, 0.03 м/с.

С использованием данных из табл. 1 в пакете Comsol численно решалось уравнение теплопроводности для области породы вблизи скважины с холодным нижним пластом фиксированной температуры (T_{CO₂} – температура закачанного в пласт CO₂) без утечки и с утечкой снизу-вверх по вертикальной трещине сверхкритического CO₂ температурой (T_{CO₂}) и скоростью (u). Трещина длиной 100 м и шириной $w=0.2$ мм располагалась вдоль стенки скважины. Найдены изменения распределения температуры в породе и скважине во времени в процессе течения сверхкритического CO₂ для разных параметров (T_{CO₂}, u).

Таблица 1

Физические параметры используемых в численной модели сред

Параметр	Название	СК CO ₂	Порода	Сталь	Вода
ρ , кг/м ³	Плотность	760	2600	8000	1000
μ , мПа·с	Вязкость	0.075	-	-	-
k , м ² /с	Температуропроводность	$3.43 \cdot 10^{-8}$	$(0.9 \div 1) \cdot 10^{-6}$	$3.7 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$
λ , Вт/(м·К)	Теплопроводность	0.073	2.4	25	0.6
C_p , Дж/(кг·К)	Удельная теплоемкость	2800	1000	500	4200

Результаты расчетов

На рис. 2 приведен температурный профиль вдоль стенки скважины, на расстоянии 0.091 м от её оси, полученный при утечке CO₂ температурой T_{CO₂} = 43 °С со скоростями u (1.0, 0.7, 0.4, 0.1, 0.03 м/с) с относительной глубины -100 м, в стационарном режиме течения (после длительного времени истечения сверхкритического CO₂ распределение температуры вдоль скважины устанавливается постоянным). На рис. 3 приведено изменение температуры упоминаемого профиля относительно его начальной температуры, до начала истечения CO₂. Из профилей для разных скоростей течения видно на какой глубине температурные дат-

чки должны охлаждаться, на какой прогреваться и на сколько сильно относительно их начальной температуры (рис. 3). Далее, если посмотреть на изменения во времени температур датчиков относительно их начальной температуры (до начала истечения CO_2), расположенных на разных глубинах, то, например, для скорости $u = 0.4$ м/с через примерно 10^5 секунд происходит переход в стационарный режим течения, при этом температуры всех датчиков ниже 80 метров охлаждаются ниже -0.8 °С относительно их начальной температуры, а для скорости течения 0.7 м/с охлаждение этих датчиков происходит еще быстрее (рис. 4 и 5).

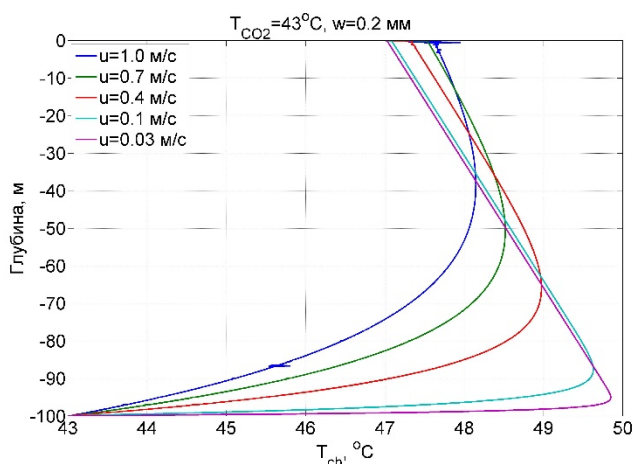


Рис. 2. Температурный профиль вдоль стенки скважины (на $r=0.091$ м от её оси) для температуры $T_{\text{CO}_2}=43$ °С и скоростей u , в стационарном режиме течения сверхкритического CO_2

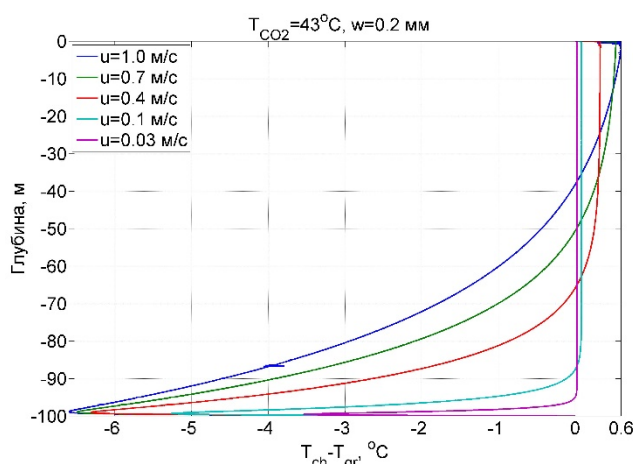


Рис. 3. Изменение температуры профиля ($r=0.091$ м) для $T_{\text{CO}_2}=43$ °С и скоростей u , относительно его начальной температуры, в стационарном режиме течения сверхкритического CO_2 .

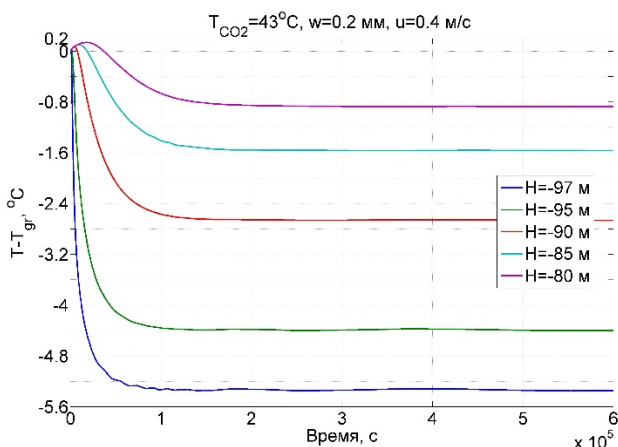


Рис. 4. Изменения во времени температур датчиков, расположенных на разных глубинах H , относительно их температуры до момента начала утечки CO_2 для $T_{\text{CO}_2}=43$ °С и скорости $u=0.4$ м/с.

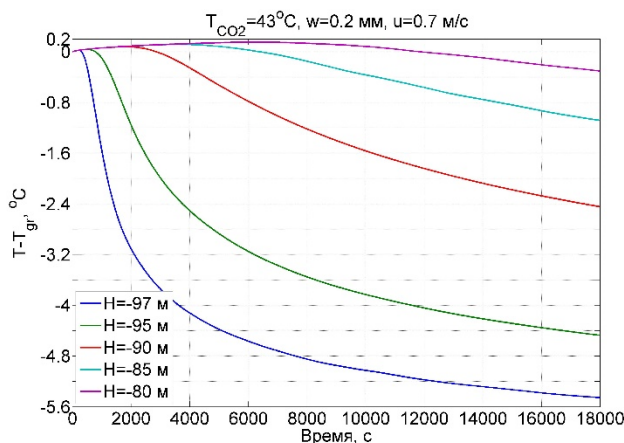


Рис. 5. Изменения во времени температур датчиков, расположенных на разных глубинах H , относительно их температуры до момента начала истечения CO_2 для $T_{\text{CO}_2} = 43$ °С и скорости $u = 0.7$ м/с.

Из представленных графических материалов были сделаны оценки характерных времен утечек CO₂ при T_{CO₂} = 43 °С и разных *u* (табл. 2), которые детектируются датчиками при понижении их температуры ниже -0.1 °С, на различном удалении от пласта с закаченным CO₂, расположенном на относительной глубине -100 м.

Таблица 2

Характерные времена (в секундах) относительного охлаждения датчиков (на разных глубинах - Н) ниже -0.1 °С для истекающего CO₂ температурой 43 °С и с разной скоростью *u*

<i>u</i> , м/с	Н, м	97	95	90	85	80
1.0		290	620	1850	3900	7000
0.7		410	990	3370	7530	14070
0.4		940	2280	9150	22250	44255
0.1		9885	29600	267550	-	-
0.03		118560	-	-	-	-

При высоких скоростях истечения CO₂ видно, что верхние датчики прогреваются выше начального температурного градиента в породе. Это происходит потому, что при течении сперва холодного CO₂ по очень тонкой цилиндрической трещине, расположенной в относительно горячей породе, он по мере поднятия прогревается и прогревает, например, для скорости 0.4 м/с, все датчики выше 60 метров.

Заключение

Для оценки минимального обнаруживаемого датчиками DTS на разных глубинах (-97, -95, -90, -85, -80 м) объема утечки CO₂ были составлены зависимости охлаждения этих датчиков во времени. Время, когда наблюдалось понижение температуры ниже референтной более, чем на точность измерения DTS (-0.1 °С), считалось моментом детектирования утечки на обозначенном датчике.

Из полученных численных расчетов были сделаны оценки характерных времен утечек для разных температур T_{CO₂}: 43, 45 и 47 °С и скоростей *u*: 1.0, 0.7, 0.4, 0.1, 0.03 м/с, по типу табл. 2, которые далее пересчитывались в таблицы с характерными для заданных свойств CO₂ минимальными детектируемыми объемами утечек CO₂ ($V = S \cdot u \cdot t$), при условии, что средняя плотность и скорость течения CO₂ по трещине не изменялась (табл. 3).

Из табл. 3 минимальный объем, детектируемый самым глубоким датчиком при самой высокой скорости истечения, составляет около 0.03 м³ CO₂ за 290 секунд мониторинга, для скорости 0.7 м/с примерно этот же объем утекает в течение 410 секунд, а для скорости 0.4 м/с обнаруживаемый объем – 0.04 м³ за 940 секунд. Для самой низкой скорости утечки этот объем составляет ~0.4 м³ за 118560 секунд или за ~1.4 суток. При этом если рассмотреть более сложный признак

утечки, отвечающий изменениям не одного датчика, а группы датчиков, то, вероятно, объем детектируемой утечки может быть уменьшен.

Таблица 3

Минимально детектируемые (в м³) объемы утечек CO₂ из пласта (температурой 43 °С, скоростью *u*) датчиками DTS, расположенными на разных глубинах (Н)

<i>u</i> , м/с	Н, м	97	95	90	85	80
1.0		0.0328	0.0702	0.2095	0.4416	0.7926
0.7		0.0325	0.0785	0.2671	0.5968	1.1151
0.4		0.0426	0.1033	0.4144	1.0077	2.0043
0.1		0.1119	0.3351	3.0293	-	-
0.03		0.4027	-	-	-	-

Благодарности

Исследование поддержано проектами FWZZ-2022-0017 и FWZZ-2022-0019 Госзадания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хаматдинов Р. Т., Козяр В. Ф., Белоконь Д. В. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ на кабеле в нефтяных и газовых скважинах // РТ Хаматдинов–М. – 2001.
2. Plasmonic temperature sensor using D-shaped photonic crystal fiber / М. А. Mollah [и др.] // Results in Physics. — 2020. — Т. 16. — С. 102966.
3. Surface plasmon resonance temperature sensor based on a photonic crystal fiber filled with silver nanowires / Т. Cheng [и др.] // Applied Optics. — 2020. — Т. 59, № 17. — С. 5108—5113.
4. Liao С., Wang D. Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing // Photonic Sensors. — 2013. — Т. 3. — С. 97—101.
5. Temperature sensor of single-mode-no-core-single-mode fiber structure coated with PDMS / Z. Wang [и др.] // Optical Fiber Technology. — 2022. — Т. 68. — С. 102793.
6. Health, safety and environmental risk assessment for geologic storage of carbon dioxide: Lessons learned from industrial and natural analogues / S. M. Benson [и др.] // Greenhouse Gas Control Technologies-6th International Conference. — Elsevier. 2003. — С. 243—248.

© С. В. Яскевич, И. И. Фадеева, 2024